

Opinnäytetyö (AMK)  
Rakennustekniikka  
Talonrakennustekniikka  
2013

Jaakko Pietilä

# TERÄSRISTIKON ALAPAARREJATKOS

– SKOL:n laskentapohjan varmennustestaus



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka | Talonrakennustekniikka

2013 | 50 + 5

Ohjaaja: Vesa Virtanen

Jaakko Pietilä

# TERÄSRISTIKON ALAPAAARREJATKOS – SKOL:N LASKENTAPOHJAN VARMENNUSTESTAUS

Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL:n laskentapohjahankkeessa tehdään talonrakennuksen rakenteiden mitoittamiseen laskentapohjia eurokoodimitoituksella, mutta ennen kuin ne voidaan ottaa käyttöön, pitää ne varmennustestata.

Varmennustestauksella testataan ohjelmat seikkaperäisesti vaihe vaiheelta. Tällöin saavutetaan vaadittava laskentapohjien luotettavuus. Näin laskentapohjia käyttävät tahot voivat varmistua ohjelman luotettavuudesta.

Opinnäytetyössä suoritettiin teräsristikon alapaaarrejahtoksen mitoittavan laskentapohjan varmennustestaus. Testauksen aikana tutustuttiin perin pohjin jatkoksen mitoittamiseen ja laskentaperiaatteisiin.

Opinnäytetyön tuloksena tuli alapaaarrejahtoksen varmennustestausraportti, joka lähetettiin laskentapohjan valmistajalle. Raportista laskentapohjan käyttäjät näkevät testauksen tulokset ja pystyvät näin varmistumaan laskentapohjan oikeasta toiminnasta.

ASIASANAT:

Liitosdetalji, teräsrakenteet, tietokoneavusteinen suunnittelu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineer | Structural Engineering

2013 | 50 + 5

Instructor: Vesa Virtanen, Principal Lecturer

Jaakko Pietilä

# EXTENSION PIECE FOR STEEL FRAME STRUCTURE TIE BEAM -Testing of SKOL worksheet

The Finnish Association of Consulting Firms SKOL has a project where different kinds of calculation worksheets in compliance with the Eurocode calculation standard are created. Before any worksheet can be taken into use, it has to be well tested.

The worksheets have to be tested by means of a verification testing process. In this manner, reliable worksheets are achieved. The goal is that the users can be sure the worksheet works properly.

This Bachelor's thesis tested a worksheet for the dimensioning of a lengthening piece for a tie beam in a steel frame structure. During the test, the Eurocode design and calculation standards were thoroughly studied.

As the result of this Bachelor's thesis, a verification test report was obtained and sent to the worksheet producer. With this report, users can see the test results and can make sure that the worksheet works properly.

## KEYWORDS:

calculation, computer-aided design, Eurocode, steel frame structure

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 EUROKOODIT</b>	<b>10</b>
<b>3 EUROCODE-LASKENTAPOHJIEN LAADINTAHANKE</b>	<b>11</b>
<b>4 LASKENTAPOHJAN TOIMINTA</b>	<b>13</b>
4.1 Laskentapohjan yleinen toiminta	13
4.2 Alapaarrejaatkoksen käyttökohteita	14
4.3 Laskentapohjan toiminnan kuvaus	15
4.4 Ruuvien leikkauskestävyys	17
4.4.1 Lähtötiedot	18
4.4.2 Laskenta	18
4.5 Reunapuristuskestävyys	20
4.5.1 Lähtötiedot	21
4.5.2 Laskenta	21
4.6 Levyjen palamurtuminen ja vetokestävyys	23
4.6.1 Lähtötiedot	23
4.6.2 Laskenta	26
4.7 Hitsit	27
4.7.1 Lähtötiedot	27
4.7.2 Laskenta	28
<b>5 TESTAUKSEN PERIAATTEET</b>	<b>30</b>
5.1 Lähtötietojen raja-arvoanalyysi	30
5.2 Tarkastusehtojen raja-arvoanalyysi	31
5.3 Kombinaatiotestaus	31
5.4 Testausprosessi	31
<b>6 LASKENTAPOHJAN TESTAUS</b>	<b>33</b>
6.1 Ruuvien leikkauskestävyys	33
6.2 Reunapuristuskestävyys	34
6.2.1 Keskilevy	35

6.2.2 Poskilevy	36
6.3 Palamurtuminen ja vetokestävyys	38
6.3.1 Keskilevy	38
6.3.2 Poskilevy	41
6.4 Hitsi	43
6.5 Kombinaatiotestaus	44
6.6 Testauksen yhteenveto	47
<b>7 TESTAUKSEN LUOTETTAVUUS</b>	<b>48</b>
<b>8 LASKENTAPOHJAN KORJAUKSET</b>	<b>49</b>
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>50</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>51</b>

## LIITTEET

Liite 1. Laskentapohjan "Lähtötiedot"-välilehti.  
 Liite 2. Laskentapohjan "Tulos"-välilehti.

## KUVAT

Kuva 1. Eri laskentapohjien suhteellinen määrä toimialaryhmien mukaan.	11
Kuva 2. Yksinkertaistettu työprosessi.	12
Kuva 3. 3D-havainnekuva alapaarrejaatkoksesta.	13
Kuva 4. Alapaarrejaatkoksen selitteitä.	14
Kuva 5. Laskentavuokaavio.	16
Kuva 6. Alapaarrejaatkoksen mittatietokuva.	17
Kuva 7. Kuvallinen selitys ruuviriveille ja -sarakeille.	18
Kuva 8. Äärimmäisten kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys.	20
Kuva 9. Leikkautumistaso kierteettömällä alueella.	20
Kuva 10. Kiinnittimien reunaetäisyyksien merkinnät.	21
Kuva 11. Yksinkertainen päällekkäisliitos, jossa on yksi ruuvisarake.	22
Kuva 12. Havainnekuva leikkaus- ja vetovoimien pinta-aloista ja mitoista.	24
Kuva 13. Levyille aiheutuvat mahdolliset palamurtumismallit.	25
Kuva 14. Selitteet murtumismalleille.	25
Kuva 15. Esimerkkimurtumismallit keski- ja poskilevyillä.	26
Kuva 16. Hitsin komponenttimenetelmän jännitykset.	28
Kuva 17. Pienahitsin a-mitta ja efektiivinen pituus $l_{eff}$ .	29

## TAULUKOT

Taulukko 1. Ruuvien leikkauspinta-ala ruuvikoon mukaan.	19
Taulukko 2. Ruuvien lujuus lujuusluokan mukaan.	19
Taulukko 3. Levyn lujuuden arvot, kun levyn paksuus $t$ on 0...80 mm.	23
Taulukko 4. Hitsin korrelaatiokerroin $\beta_w$ lujuuden mukaan.	27
Taulukko 5. Ruuvien leikkauskestävyyden lähtöarvojen vaihtoehdot.	33
Taulukko 6. Ruuvien leikkauskestävyyden tulokset.	34
Taulukko 7. Reunapuristuskestävyyden lähtöarvovaihtoehdot keskilevyllä.	35
Taulukko 8. Välitarkistusarvot $k_1$ ja $a_b$ reunapuristuskestävyydessä keskilevyllä.	35
Taulukko 9. Reunapuristuskestävyyden tulokset keskilevyllä.	36
Taulukko 10. Reunapuristuskestävyyden lähtöarvovaihtoehdot poskilevyllä.	37
Taulukko 11. Välitarkistusarvot $k_1$ ja $a_b$ reunapuristuskestävyydessä poskilevyllä.	37
Taulukko 12. Reunapuristuskestävyyden tulokset poskilevyllä.	37
Taulukko 13. Pala- ja vetomurtumisen lähtöarvovaihtoehdot keskilevyllä.	39
Taulukko 14. Palamurtumisen tulokset keskilevyllä.	40
Taulukko 15. Vetomurtumisen tulokset keskilevyllä.	40
Taulukko 16. Pala- ja vetomurtumisen lähtöarvovaihtoehdot poskilevyllä.	41
Taulukko 17. Palamurtumisen tulokset poskilevyllä.	42
Taulukko 18. Vetomurtumisen tulokset poskilevyllä.	42
Taulukko 19. Lähtöarvovaihtoehdot hitsin tarkistukseen.	43
Taulukko 20. Hitsin tulokset.	44
Taulukko 21. Lähtöarvovaihtoehdot kombinaatiotestaukseen.	45
Taulukko 22. Kombinaatiotestauksen käsin lasketut käyttöasteet.	46
Taulukko 23. Kombinaatiotestauksen ohjelman laskemat käyttöasteet.	46
Taulukko 24. Kombinaatiotestauksen kokonaiskäyttöasteet.	47

## KÄYTETYT LYHENTEET

$\sigma_{\perp}$	Normaalijännitys, joka välittyy hitsiin kohtisuorasti
$\tau_{\perp}$	Leikkausjännitys, joka tulee kohtisuorasti hitsin akselille
$\tau_{  }$	Hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys
A	Pinta-ala (bruttopoikkileikkaus)
$a_b$	Varmuuserroin
$A_{net}$	Levyn nettopoikkileikkauksen pinta-ala
$A_{nt}$	Levyn murtopinta-ala
$A_{nv}$	Levyn leikkautumispinta-ala
$A_s$	Ruuvien jännityspoikkipinta-ala
$A_w$	Hitsin leikkauspinta-ala
d	Ruuvien halkaisija
$d_0$	Levyn tuleva reikäkoko
$e_1$	Päätetäisyys
$e_2$	Reunatäisyys
EC	Eurocode (suom. eurokoodi)
EN-standardi	Vahvistetut ja käytössä olevat eurokoodit
ENV-esistandardi	Eurokoodeja edeltäneet standardit, joiden pohjalta käytössä olevat eurokoodit on tehty
$F_{b, Rd}$	Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo
$f_{u,l}$	Levyn murtolujuus
$f_{ub}$	Vetomurtolujuus
$F_{v, Rd}$	Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo ruuvia kohti
$f_{y,l}$	Levyn myötölujuus
$k_1$	Varmuuserroin
$L_j$	Äärimmäisten kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys
NA	National Annex eli EN-standardien kansallinen liite
$N_{pl,Rd}$	Bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen kestä- vyyden mitoitusarvo

$N_{u,Rd}$	Nettopoikkileikkauksen kestävyysmitoitussarvo
$p_1$ ja $p_2$	Keskiöväliarvot
Proto	Rakennesan laskentapohjan raakaversio, joka näyttää, miten rakennesan laskenta on suunniteltu toimivan ja käyttäytymän.
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SKOL	Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto
$t_1$	Keskilevyn paksuus
$t_3$	Poskilevyn paksuus
$V_{eff,1,Rd}$	Murtokestävyys
$\beta_{Lf}$	Pienennystekijä (lujuuden pienennyskerroin)
$\beta_w$	Hitsin korrelaatiokerroin
$\gamma_{M0}$	Osavarmuuskerroin 1,0
$\gamma_{M2}$	Osavarmuuskerroin 1,25



# 1 JOHDANTO

Siirryttäessä eurokoodimitoitukseen tulee Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaiset suunnitteluohjelmistot vanhenemaan. Tämä aiheuttaa yrityksille ja oppilaitoksille paineita uudistaa ohjelmistokantaansa. Monella yrityksellä ei ole resursseja tehdä omia laskentapohjia, eikä niitä ole Suomessa oikein saatavillaakaan.

Selkeä tarve uusille, eurokoodimitoituksella laskeville pohjille oli siis jo olemassa. Tähän haasteeseen Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL ry tarttui aloittamalla laskentapohjien valmistushankkeen. Hankkeeseen koottiin yrityksistä, oppilaitoksista ja materiaalityöntekijöistä ryhmiä, jotka toteuttavat ja testaavat laskentapohjia SKOL:n koordinoimana. Kun laskentapohjat valmistuvat, ne on tarkoitus jakaa hankkeeseen osallistuneiden kesken ilman rahallista kompensatiota. Jotta laskentapohjia käyttävät tahot voivat varmistua pohjien oikeasta toiminnasta, tulee ne varmennustestata.

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa yhden laskentapohjan, teräsristikon alapaarrejauskokson, varmennustestaus. Tämä työ toteutettiin yhdessä laskentapohjien valmistushankkeeseen osallistuneen suunnittelutoimisto Optiplan Oy:n kanssa.

Opinnäytetyössä käydään läpi testauksen vaiheet, mitoituksen periaatteet sekä käytettävät laskentakaavat. Varmennustestauksella pyritään varmistumaan siitä, että laskentapohja on virheetön ja sillä on turvallista mitoittaa alapaarrejauskoksia.

## 2 EUROKOODIT

Eurokoodit ovat eurooppalaisia suunnittelustandardeja rakennesuunnitteluun, ja ne koostuvat 58 osasta. Ne ovat kattava paketti materiaalien suunnittelutiedoista, laskentamenetelmistä sekä mitoitusperusteista. Ne ovat suunnittelijan työkalu mitoittaa rakennus tai rakennelma kestäväksi eri ihmisten ja luonnonvoimien aiheuttamia vaatimuksia vastaan. (Eurokoodi help desk 2012.)

Vaikka standardit ovat eurooppalaisille samat, niiden soveltaminen eri maissa vaatii kuitenkin kansallisen liitteen laatimisen. Suomessa kansallisen liitteen laadinnasta vastaa ympäristöministeriö talonrakentamisen osalta. Suomessa eurokoodeja voi ostaa Suomen standardisoimisliitolta, joka julkaisee niitä. (Eurokoodi help desk 2012.)

Eurokoodit ovat olleet jo pitkään käytössä rinnakkain Suomen rakentamismääräyskokoelman kanssa, mutta rinnakkaiskäyttö poistuu ympäristöministeriön arvion mukaan 30.6.2013. Tästä eteenpäin käytössä ovat ainoastaan eurokoodit, ja ne ovat näin ollen ainoat rakennusvalvontaan kelpaavat laskenta- ja mitoitusperusteet. (Ympäristöministeriö 2012.)

Eurokoodeja on tullut käyttöön sitä mukaan, kun niistä tehdyt kansalliset liitteet ovat julkaistu. Eurokoodien ENV-esistandardien käyttö lopetettiin 30.3.2010. (Ympäristöministeriö 2012; Eurokoodi help desk 2012.)

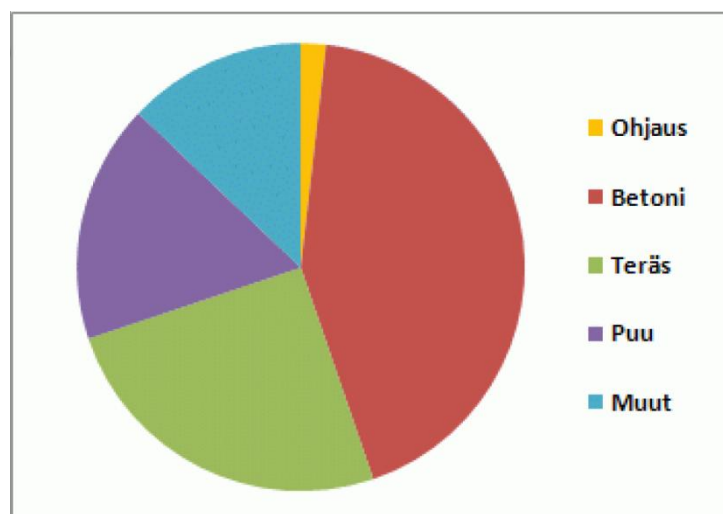
Teräsrakenteiden osalta tässä työssä noudatetaan Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu -standardia (EN 1993). Tästä standardista käytetään osia SFS-EN 1993-1-8: Liitosten suunnittelu ja SFS-EN 1993-1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

### 3 EUROCODE-LASKENTAPOHJIENTEN LAADINTAHANKE

Koska eurokoodimitoitukseen siirtyminen tulee hankaloittamaan suunnittelutoimistojen työskentelyä, asetettiin SKOL:n toimesta työryhmä selvittämään mahdollista eurokoodimitoitushjelmistojen tarvetta. Ohjelmistoille tai laskentapohjille nähtiin selkeää tarve, koska suunnittelutoimistot joutuisivat muutenkin uusiin ohjelmistokantansa. Kaupallisia laskentasovellutuksia on tehty, mutta laskentakäytännöt ovat eurokoodimitoituksesta huolimatta vieläkin kansallisesti hieman eriäviä, koska ne eivät sisällä Suomen kansallista liitettä (FIN-NA). (Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto ry 2008.)

Eri ohjelmistojen tarve selvitettiin kyselyllä suunnittelutoimistoille. Samalla kartoitettiin vanha ohjelmistokanta ja niiden soveltuvuus eurokoodeille. Tavoitteena on, että laskentapohjat saavuttavat riittävän tason käytännön rakennesuunnittelulle. Laskentapohjien tulisi olla myös hyvin rakennemitoitukseen soveltuvia sekä toiminnaltaan virheettömiä. (SKOL 2008.)

Kyselyllä selvisi, että tarvittavia laskentapohjia olisi noin 150 kappaletta. Näistä noin 25 % olisi teräsrakenteiden mitoitushjelmia, kuten kuvassa 1 esitetään (SKOL 2008).

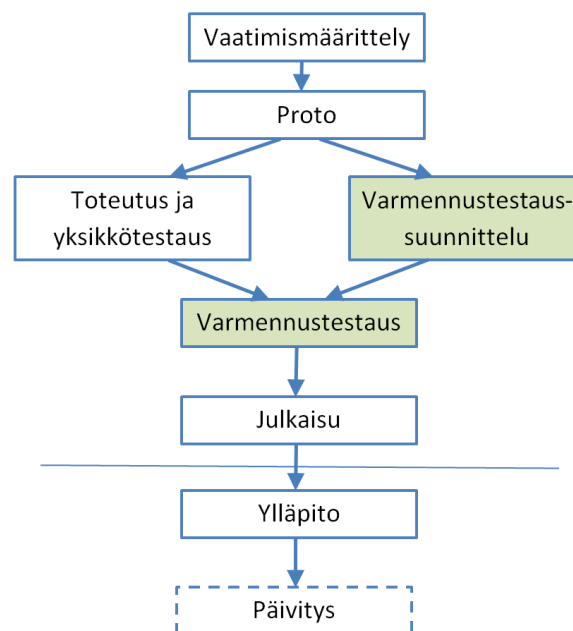


Kuva 1. Eri laskentapohjien suhteellinen määrä toimialaryhmien mukaan (Koponen 2009, 5).

Hankkeeseen osallistui 17 jäsenyritystä, yhdeksän oppilaitosta ja kolme materiaalijärjestöä. Hanke toteutetaan siten, että yritykset, oppilaitokset ja materiaali-järjestöt saavat tehtäväkseen toteuttaa laskentapohjia käytössä olevien suhteellisten resurssien ja hyödyntämismahdollisuuksien mukaan ns. vastavuoroisuus- ja tasapuolisuusperiaatteella. Rahallista kompensatiota ei käytetä, vaan osapuolet jakavat keskenään valmistuneet laskentapohjat. Laskentapohjia ei kuitenkaan saa luovuttaa kolmansille osapuolille. (SKOL 2008.)

Laskentapohjat tulee laatia joko Mathcad-ohjelmalla tai Microsoft Excel -ohjelmistolla. Laskentapohjat toteutetaan niille määritellyn testausohjeen mukaan, mutta ohjelmistojen käyttäjät vastaavat laskentapohjien ja sovellusten käytöstä sekä niihin liittyvistä virheistä, joita ei varmennustestauksesta huolimatta ole löydetty. (SKOL 2008.)

Vaatimismäärittelyn jälkeen laskentapohjasta suunnitellaan ja valmistetaan prototyyppi. Toteutuksen ja yksikkötestauksen jälkeen tehdään varmennussuunnitelma, jonka jälkeen laskentapohja varmennustestataan. Onnistuneen testauksen jälkeen ohjelma julkaistaan ja se siirtyy ylläpitovaiheeseen kuvassa 2 esitetyn kaavion mukaan. (SKOL 2008.)

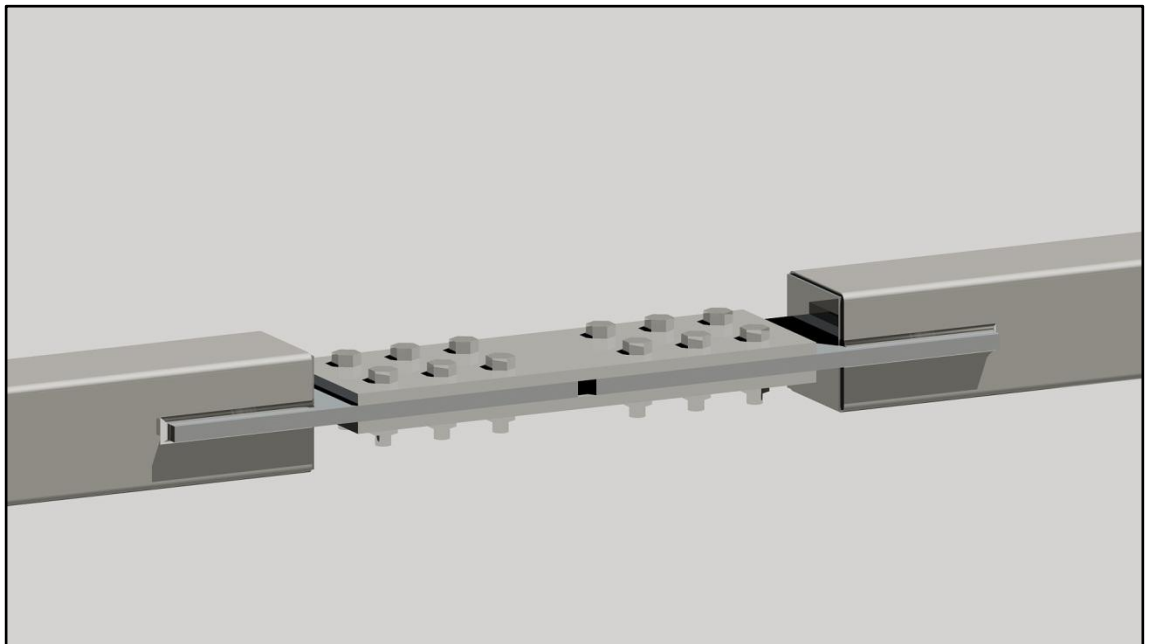


Kuva 2. Yksinkertaistettu työprosessi.

## 4 LASKENTAPOHJAN TOIMINTA

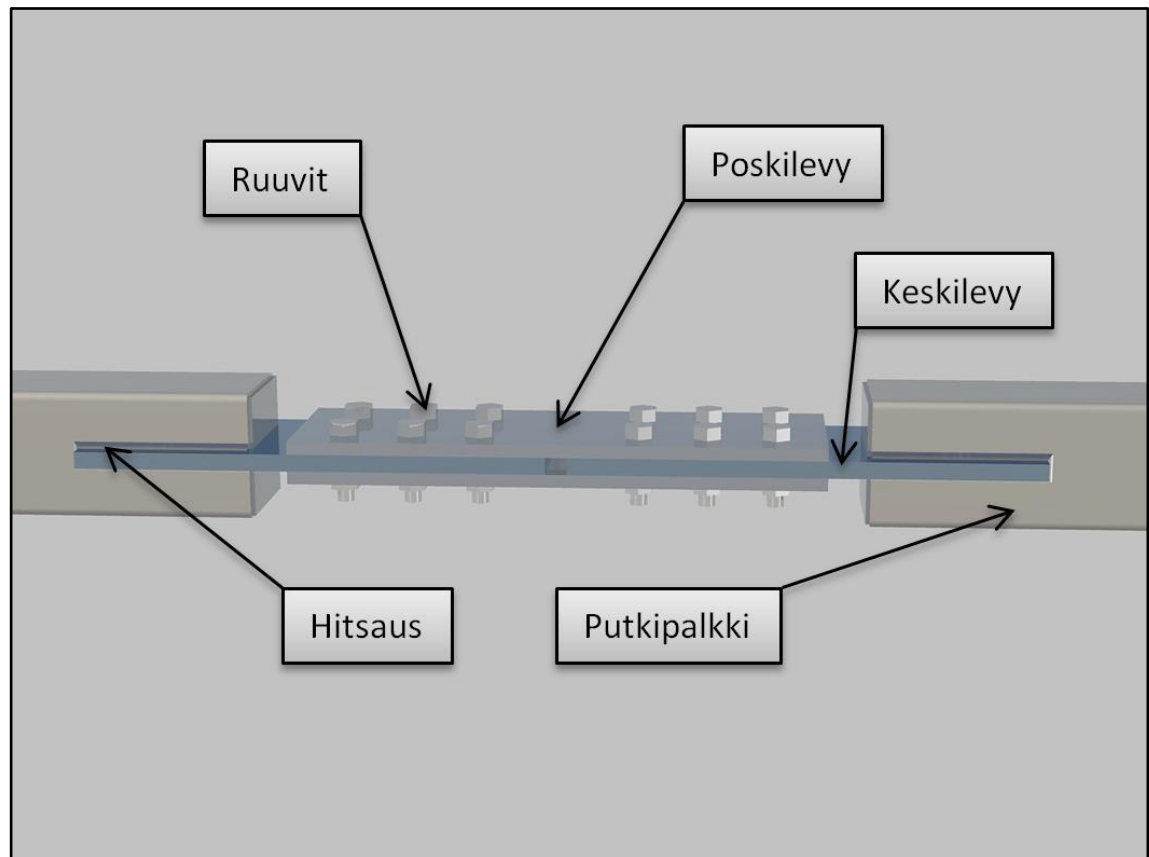
### 4.1 Laskentapohjan yleinen toiminta

Alapaarrejatkos-laskentapohja on suunniteltu mitoittamaan putkiprofiilista valmistetun teräsristikon vedetyn alapaarteiden jatkos (kuva 3). Mitoitus alkaa syöttämällä ohjelmaan alapaarteelle tuleva voima. Tämä voima täytyy ensin määrittää jollakin toisella ohjelmalla tai laskea käsin. Ohjelma laskee ruuvien kestävyiden lisäksi myös levyjen ja hitsin kestävyiden suunnittelijan määrittelemillä mitoilla.



Kuva 3. 3D-havainnekuva alapaarrejatkoksesta.

Laskentapohja ilmoittaa käyttöasteen kustakin laskentaosasta. Laskentaosia ovat ruuvien leikkauskestävyys, keskilevyn reunapuristuskestävyys, poskilevyjen reunapuristuskestävyys, keskilevyn palamurtuminen, poskilevyjen palamurtuminen, keskilevyn vetokestävyys, poskilevyjen vetokestävyys sekä hitsin kestävyys. Kuvassa 4 on selitteet merkitty havainnekuvaan.



Kuva 4. Alapaarrejatkoksen selitteitä.

#### 4.2 Alapaarrejatkoksen käyttökohteita

Laskentapohjan käyttämä liitostyyppi, limitetty vetoliitos, soveltuu hyvin ristikon alapaarteiden jatkosliitokseksi, koska kuormitus tapahtuu levyjen suuntaisesti. Tällöin lamellirepeilyvaara liitoslevyillä eliminoiduu. (Rautaruukki 2012.)

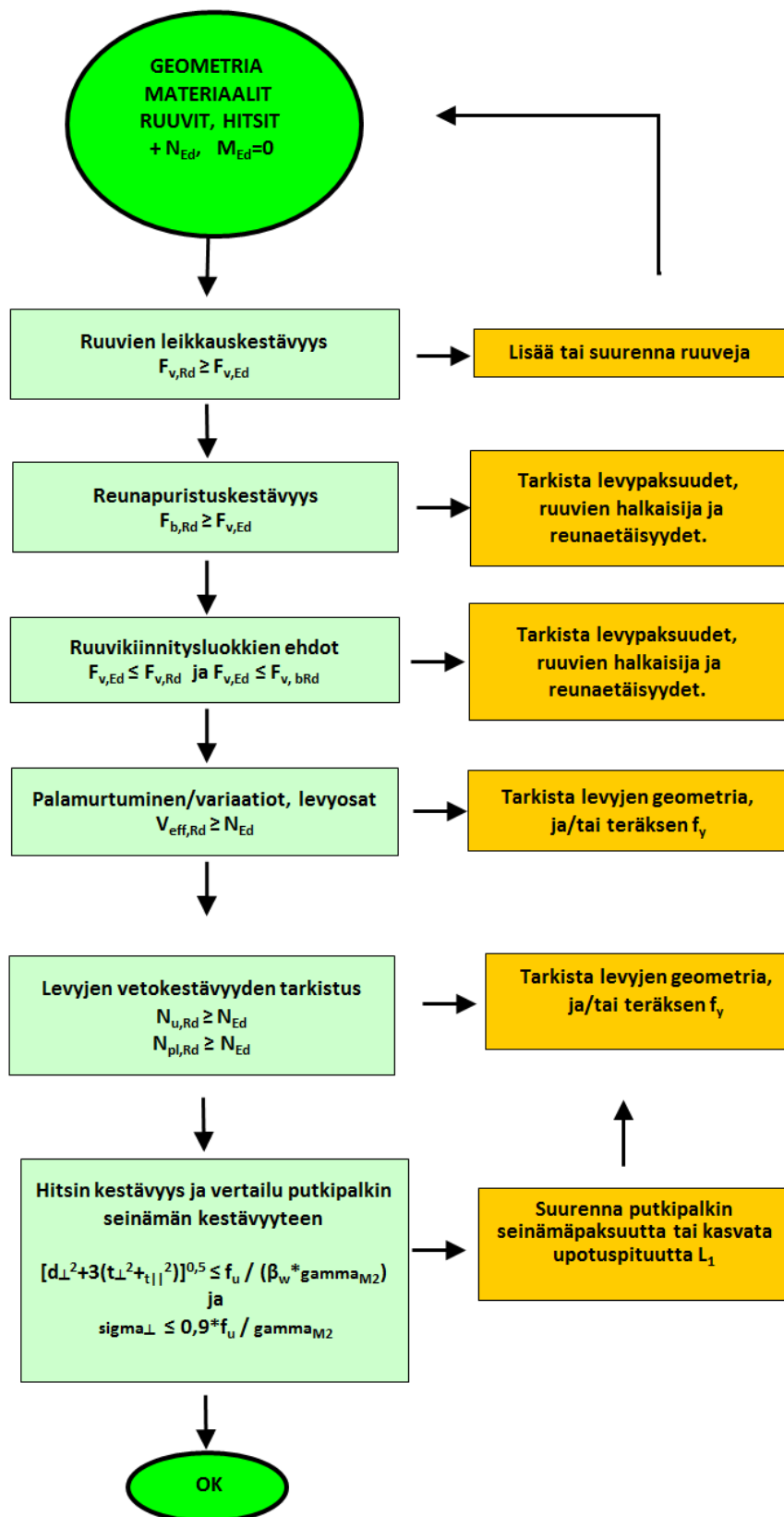
Suuria teräsristikoita ei kannata tehdä yhtenä kappaleena, kun kyseessä on esimerkiksi 50 m pitkä jänneväli. Näin pitkiä kokoonpanoja on ensinnäkin vaikea valmistaa, mutta myös vaikea kuljettaa työmaalle. (T. Ahti, henkilökohtainen tiedonanto 12.2.2013.)

Tällaisiin tilanteisiin käytetään alapaarrejatkosta yläpaarrejatkoksen parina. Liitos tehdään pääsääntöisesti aina ristikon keskelle. Useamman jatkoksen käyttö aiheuttaisi taipumia alapaarteelle, koska ruuvirei'illä on omat toleranssinsa. Jat-

kos sopii käytettäväksi kaikkiin ristikkotyyppeihin, jos jatkokseen on tarvetta. (T. Ahti, henkilökohtainen tiedonanto 12.2.2013.)

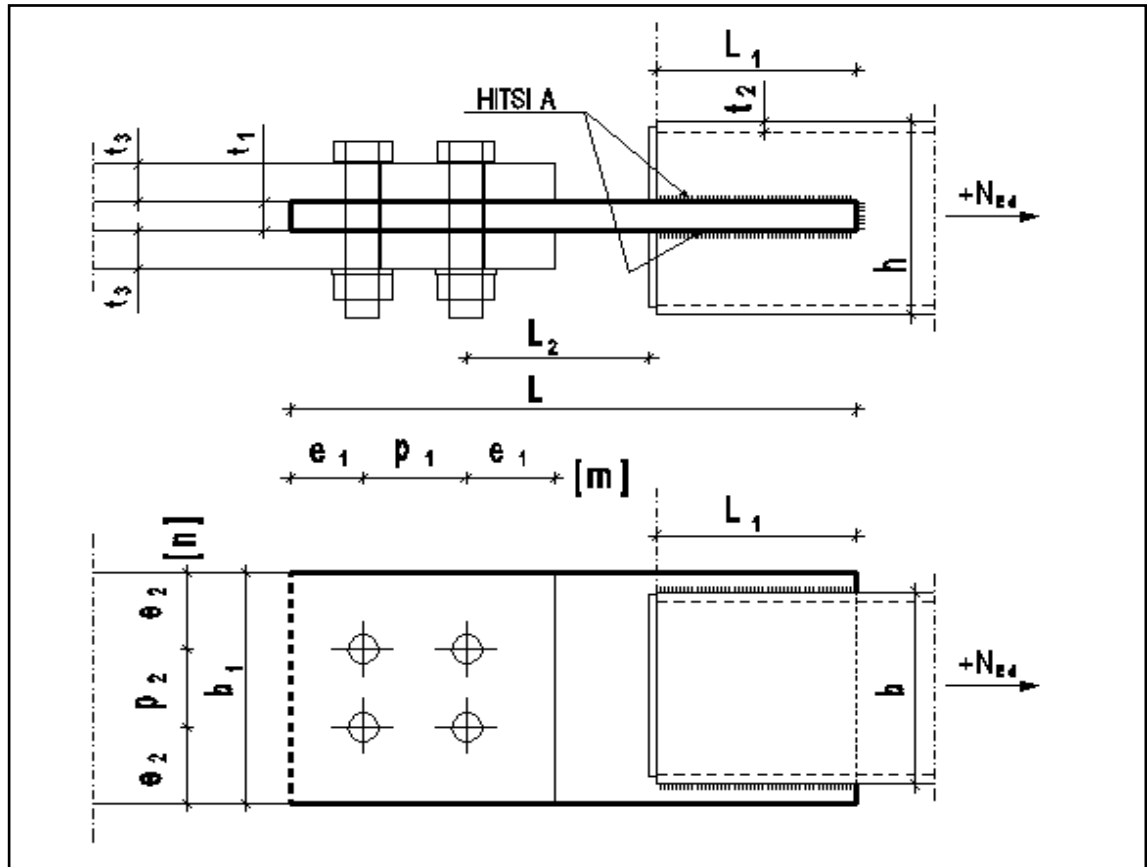
#### 4.3 Laskentapohjan toiminnan kuvaus

Tämä laskentapohja on toteutettu Microsoft Excel -ohjelmalla. Laskenta alkaa "Lähtötiedot"-välilehdellä lähtötietojen syötöllä (liite 1). Ohjelma varoittaa, mikäli lähtöarvot eivät ole sallittujen arvojen sisällä. Kun lähtötiedot on syötetty, tarkistetaan "Laskenta"-välilehdeltä käyttöasteet valituille mitoituksille. Kun käyttöasteisiin ollaan tyytyväisiä, "Tulos"-välilehdeltä tulostetaan kuvallinen sivu mittatiedoista ja käyttöasteista (liite 2). "Ohje"-välilehdellä on ohjeita ohjelman käyttäjälle. "Vuokaavio"-välilehdeltä löytyy laskentavuokaavio laskennan etenemisestä (kuva 5). Kuvassa 6 esitetään "Lähtötiedot"-välilehdellä oleva mittatietokuva, jossa näkyy kaikki laskentapohjaan syötettävät mitat ja määrytykset. Ruuvimäärä voi tosin olla eri kuin kuvassa.



Kuva 5. Laskentavuokaavio.





Kuva 6. Alapaarreatkoksien mittatietokuva.

#### 4.4 Ruuvien leikkauskestävyys

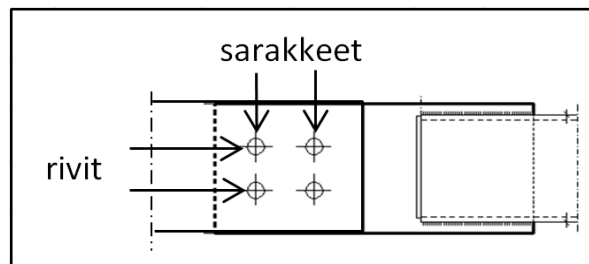
Tässä kappaleessa esitetään, miten ruuvien leikkauskestävyys laskennassa määritetään. Ensin esitellään, miten lähtötiedot määritetään laskentapohjaan. Tämän jälkeen selvitetään laskennan vaiheet.

Jotta laskentaa voidaan suorittaa, on ensin tiedettävä joitain lähtötietoja. Tässä tapauksessa tiedetään yleensä aina liitokselle tuleva kuorma tai rasitus. Liitokselle tuleva kuorma on lähtökohtaisesti aina selvítettävä ennen varsinaista mitoitus. Tämä tehdään käsin laskemalla tai jollakin toisella ohjelmalla.

#### 4.4.1 Lähtötiedot

Lähtötiedoista ensimmäisenä syötetään jatkokselle tuleva kuorma. Ohjelma laskee kuorman aina vetona alapaarteen luonteesta johtuen. Ruuvitiedot syötetään seuraavana. Näistä ensimmäisenä annetaan ruuvin koko. Kokovaihtoehtoja on M12, M16, M20, M24 ja M30, ja ne valitaan pudotusvalikosta. Seuraavana syötetään ruuvirivien ja ruuvisarakkeiden lukumäärät. Kumpaankin suuntaan on mahdollista valita 1...10 riviä tai saraketta, ja nekin valitaan pudotusvalikosta. Tämän jälkeen valitaan vielä ruuvien lujuusluokka 8.8 tai 10.9 pudotusvalikosta ja vastataan kyselylle ”Sijaitseeko kierre leikkaustasossa?” Kyllä tai Ei. Näillä lähtötiedoilla ohjelma laskee käyttöasteen ruuvien leikkauskestävyydestä kuorman suhteen. Ruuvirivit ovat voiman suuntaisia, ja ruuvisarakkeet ovat voimaa kohtisuoraan (kuva 7).

Koska alapaarrejaatkoksessa on kolme päällekkäistä levyä, syntyy ruuveihin kaksi leikettä. Leikkauskestävyyttä määriteltäessä tämä on huomioitava kertomalla kaavasta saatu tulos kahdella, koska kaava määrittelee kestävyyden leikettä kohti.



Kuva 7. Kuvallinen selitys ruuviriveille ja -sarakeille.

#### 4.4.2 Laskenta

Leikkautumistason ollessa kierteettömällä alueella, ruuvien leikkauskestävyys leikettä kohti on

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}},$$

ja jos leikkautumistaso on kierteellisen osan alueella 8.8-lujuusluokan ruuveilla, niin

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}},$$

mutta käytettäessä 10.9-lujuusluokan ruuveja leikkauskestävyys on

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}}. \text{ (SFS-EN 1993-1-8, 28.)}$$

Taulukko 1. Ruuvien leikkauspinta-ala ruuvikoon mukaan.

Ruuvi	As (mm <sup>2</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )
M12	84,30	113,10
M16	157,00	201,06
M20	245,00	314,16
M24	353,00	452,39
M30	561,00	706,86

Taulukko 2. Ruuvien lujuus lujuusluokan mukaan.

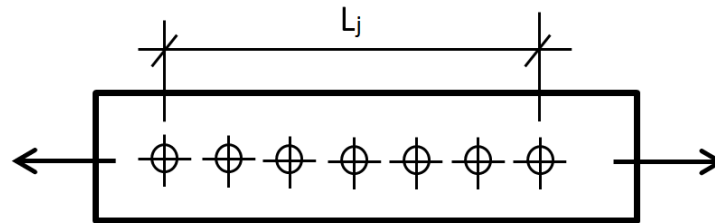
Lujuus	8.8	10.9
f <sub>ub</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	800	1000

Pitkiä liitoksia suunnitellessa on otettava huomioon, että ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvoa  $F_{v,Rd}$  pienennetään kertomalla se pienennystekijällä  $\beta_{Lf}$  (SFS-EN 1993-1-8, 31).

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 \times d}{200 \times d},$$

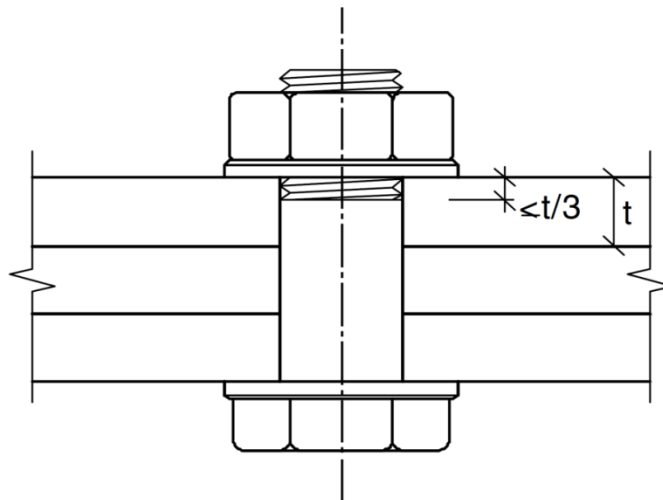
$$\text{mutta} \quad \beta_{Lf} \leq 1,0 \text{ ja } \beta_{Lf} \geq 0,75,$$

jossa  $L_j$  on äärimmäisten kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys. Mikäli  $L_j$  on suurempi kuin siirrettävän voiman suunnassa  $15 \times d$  (kuva 8),  $\beta_{Lf}$  pienenee ja antaa näin varmuutta liitokselle. (SFS-EN 1993-1-8, 31.)



Kuva 8. Äärimmäisten kiinnittimien keskiöiden välinen etäisyys.

Jotta ruuvit voidaan mitoittaa kierteettömällä alueella, täytyy ruuvin kierteellisen osan olla pienempi tai yhtä suuri kuin kolmasosa levyn paksuudesta mutterin puolelta (kuva 9). Jos ehto ei täyty, täytyy ruuvien leikkauskestävyyden mitoituksessa käyttää ruuvin leikkauspinta-alana jännityspoikkipinta-alaa  $A_s$ , joka on noin  $0,78 \times A$ . (SFS-EN 1993-1-8, 26.)



Kuva 9. Leikkautumistaso kierteettömällä alueella (SFS-EN 1993-1-8, 27).

#### 4.5 Reunapuristuskestävyys

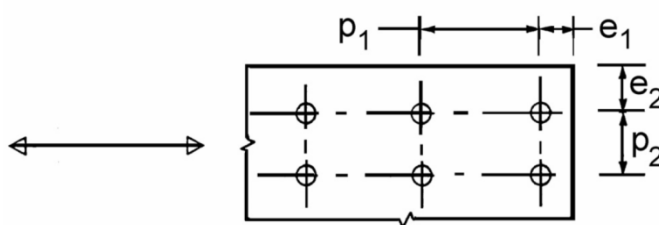
Tässä osassa kuvataan ohjelmassa tarvittavat lähtötiedot reunapuristuskestävyyden laskentaan. Tämän jälkeen kuvataan reunapuristuskestävyyden laskennan vaiheet ja kaavat.

Liitosta mitoittaessa on oltava tarkkana eri ruuvien reunaetäisyysarvojen minimiarvoista, koska liitosta ei voida mitoittaa oikein, jos reunaetäisyydet eivät ole sallittujen rajojen sisällä.

#### 4.5.1 Lähtötiedot

Reunapuristuskestävyyttä mitoittaessa lähtötiedoista annetaan levyjen paksuudet, ruuvien halkaisija, reikäkoko sekä ruuvien ja levyn murtolujuus. Reunapuristuskestävyys lasketaan ruuvien summana siten, että käytetään pienintä yksittäisen ruuvin kestävyysmitoitussarvoa, joka on  $F_{b,Rd}$  tai  $F_{v,Rd}$  sen mukaan, kumpi on pienempi. (SFS-EN 1993-1-8, 31.)

Lisäksi reunapuristuskestävyyttä mitoittaessa tarvitaan myös levyosan reunaetäisyyssarvot, jotka ovat päätyetäisyys  $e_1$ , reunaetäisyys  $e_2$ , keskiöväli  $p_1$  sekä toiseen suuntaan keskiöväli  $p_2$  (kuva 10).



Kuva 10. Kiinnittimien reunaetäisyyksien merkinnät (SFS-EN 1993-1-8, 25).

#### 4.5.2 Laskenta

Näiden lähtöarvojen perusteella voidaan reunapuristuskestävyydelle laskea arvot  $k_1$  ja  $a_b$  (SFS-EN 1993-1-8, 28). Näistä  $k_1$  on pienin arvoista

$$2,8 \times (e_2 \div d_0) - 1,7 \text{ ja } 2,5$$

reunarivin ruuveille ja

$$1,4 \times (p_2 \div d_0) - 1,7 \text{ ja } 2,5$$

muun rivin ruuveille. Reunapuristuskestävyyden kerroin  $a_b$  puolestaan on pienin arvoista

$$e_1 \div (3 \times d_0), f_{ub} \div f_{u,l} \text{ tai } 1,00$$

reunasarakkeen ruuveille ja

$$p_1 \div (3 \times d_0) - 1,4, f_{ub} \div f_{u,l} \text{ tai } 1,00$$

muun sarakkeen ruuveille.

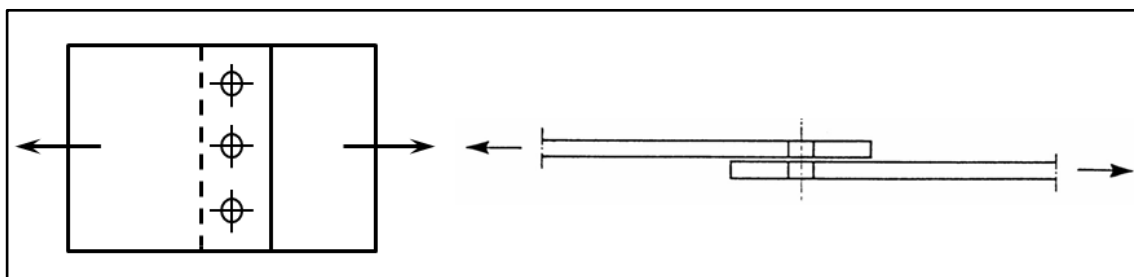
Reunapuristuskestävyydelle lasketaan yhdestä neljään arvoa sen mukaan, kuinka monta ruuvia liitoksessa on. Esimerkiksi jos liitoksessa on vain yksi ruuvi, tarvitaan vain yhtä  $k_1$ - ja  $a_b$ -arvoin laskettua kestävyyttä. Tällöin  $k_1$ -arvona käytetään reunarivin ruuveille ja  $a_b$ -arvona käytetään reunasarakkeen ruuveille olevaa arvoa. Mikäli taas ruuveja on molempiin suuntiin yli 2 kpl, lasketaan arvot jokaiselle neljälle vaihtoehdolle, jotka ovat

1. reunarivin sekä reunasarakkeen ruuvi
2. reunarivin sekä muiden kuin reunasarakkeiden ruuvi
3. muun kuin reunarivin, mutta reunasarakkeen ruuvi
4. muiden kuin reunarivin sekä muiden kuin reunasarakkeen ruuvi.

Näitä jokaiselle vaihtoehdolle lasketaan arvo kaavalla  $F_{b,Rd} = (k_1 \times a_b \times f_{u,l} \times d \times t) / \gamma_{M2}$  (SFS-EN 1993-1-8, 28).

Pääty- ja reunaetäisyyksien sekä keskiövälien minimiarvot ovat  $e_1 = 1,2d_0$ ,  $e_2 = 1,2d_0$ ,  $p_1 = 2,2d_0$  ja  $p_2 = 2,4d_0$ . (SFS-EN 1993-1-8 3, 24.)

Laskentapohja mitoittaa myös niin sanotun riskitapauksen, jossa käytetään vain yhtä ruuvisaraketta (kuva 11). Tällaisessa tapauksessa reunapuristuskestävyys  $F_{b,Rd}$  yhdelle ruuville rajoitetaan arvoon  $F_{b,Rd} \leq f_{u,l} \times d \times t / \gamma_{M2}$  (SFS-EN 1993-1-8, 26).



Kuva 11. Yksinkertainen päällekkäisliitos, jossa on yksi ruuvisarake.

Vaikka kyseinen tapaus on esitetty standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan tarkasteltavaksi vain silloin, kun kyseessä on yksinkertainen päällekkäisliitos (alapaarrejaatkoksessa on vain kaksinkertaisia liitoksia), on syytä silti käyttää vastaavaa rajoitetta tällaisten riskitapausten takia liitokselle varmuutta antamaan (T. Ahti, henkilökohtainen tiedonanto 17.12.2012.)

Mikäli levyosan paksuus on 40 mm:n ja 80 mm:n välissä, levyn lujuutta rajoitetaan taulukon 3 mukaan.

Taulukko 3. Levyn lujuuden arvot, kun levyn paksuus  $t$  on 0...80 mm.

Lujuus- luokka	$t < 40 \text{ mm}$		$40 < t < 80 \text{ mm}$	
	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470

#### 4.6 Levyjen palamurtuminen ja vetokestävyys

Tässä osassa on kuvattu levyjen palamurtumisten ja vetokestävyysien laskenta. Lähtötiedoissa käydään läpi laskentaan tarvittavat lähtöarvot ja laskennassa käytettävät lyhenteet. Laskentapohja mitoittaa keskilevyn ja poskilevyjen palamurtumisen ja vetokestävyyskäyttöasteet erikseen.

Koska levyt itsessään tulevat harvoin määrääväksi mitoitusperusteeksi liitokselle, on kiinnitettävä erityistä huomiota ruuvien asetteluun. Ruuvit ovat jo asetettu levyille reunapuristusta mitoittaessa, mutta asia konkretisoituu vasta kun mitoitaan levyjen vetomurtokestävyyttä ja palamurtumista.

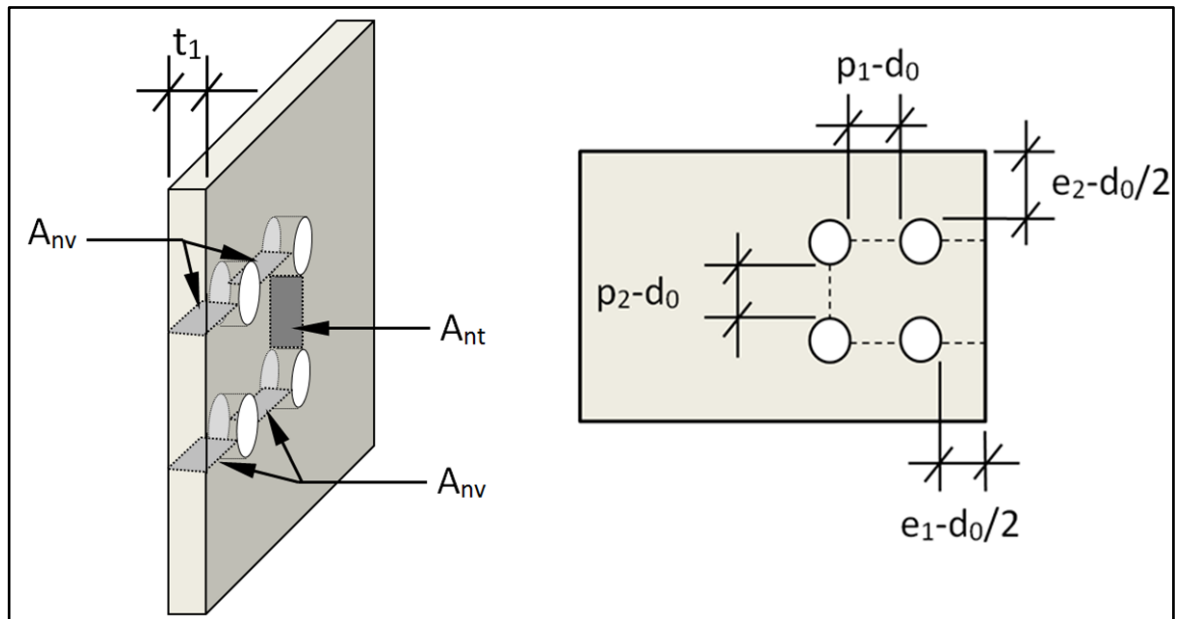
##### 4.6.1 Lähtötiedot

Palamurtumisen ja vetokestävyysien tarkistukseen tarvitaan lähtöarvoista edelleen reuna- ja keskiöetäisyysarvoja. Levyn mitoitusiedoista tarvitaan leveyttä  $b_1$

ja paksuuksia  $t_1$  sekä  $t_3$ , koska palamurtuminen mitoitetaan sekä keski- että poskilevylle. Myös levyn teräksen myötölujuus  $f_{y,l}$  tarvitaan. Ruuvien lähtöarvoista tarvitaan ruuvireiän halkaisijaa  $d_0$ , ruuvirivien ja ruuvisarakkeiden määrää sekä ruuvien murtolujuutta  $f_{u,l}$ .

Edellä mainituilla lähtöarvoilla voidaan laskea kuvassa 12 esiintyvät pinta-alat  $A_{nv}$  ja  $A_{nt}$ , joilla levy leikkaantuu ja/tai murtuu. Kertomalla pinta-alat murtolujuuksilla voidaan laskea levyjen murtokestävyydet.

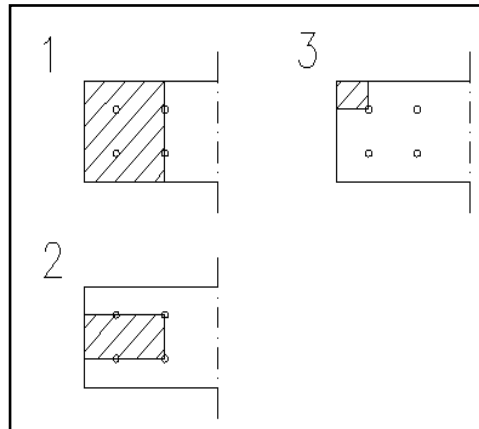
Ruuvireiän halkaisijan laskentapohja mitoittaa automaattisesti valitun ruuvikoon perusteella. Teräksen lujuus ja ruuvien määrät valitaan pudotusvalikosta, ja loput lähtöarvot syötetään käsin.



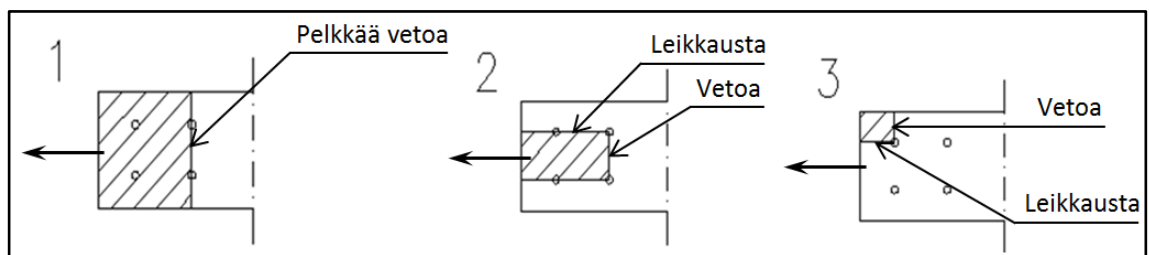
Kuva 12. Havainnekuva leikkaus- ja vetovoimien pinta-aloista ja mitoista.

Palamurtuminen tapahtuu tässä tapauksessa kolmella eri vaihtoehdolla (kuva 13). Näistä ensimmäisessä murtumismallissa tapahtuu perusaineen vetomurtuminen viimeisen ruuvisarakkeen kohdalta. Toisessa mallissa levy leikkautuu leikkauspinnoissa  $A_{nv}$  ja vetomurtuu murtopinnassa  $A_{nt}$  (kuva 12). Kolmannessa murtumismallissa levystä lähtee vain pala kulmasta yhdelle ruuville tulevan voiman ylittäessä kulman veto- ja leikkauskestävyyden (kuva 14).





Kuva 13. Levyille aiheutuvat mahdolliset palamurtumismallit.

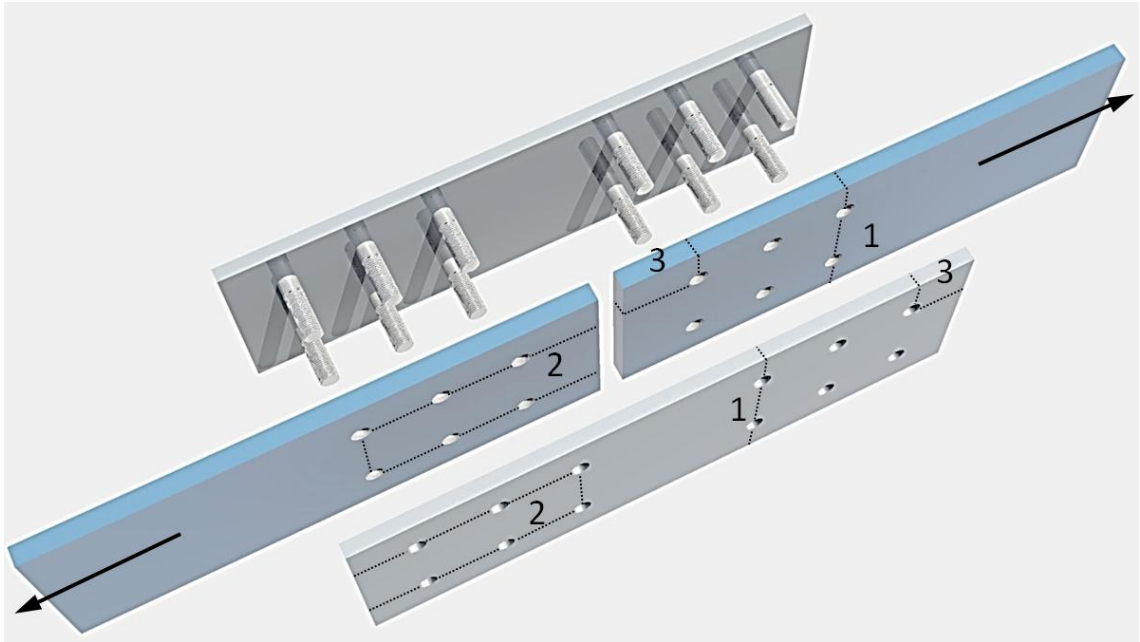


Kuva 14. Selitteet murtumismalleille.

Laskentapohja ilmoittaa käyttöasteen kustakin murtumistavasta. Tämän lisäksi ohjelma laskee myös levyn vetokestävyyden käyttöasteen.

Levyosan lujuutta rajoitetaan kuten reunapuristuskestävyyden mitoituksessa, kun sen paksuus on 40 mm:n ja 80 mm:n välissä (taulukko 3). Laskentapohjan mitoitus rajoittaa levyn maksimipaksuuden 80 mm:iin.

Kuvassa 15 nähdään räjäytettyyn havainnekuvaan piirretyt murtumismallit keski- ja poskilevyillä. Kuvassa näkyy myös liitoksen detali siitä, miten liitos toimii, kun se on vedetty, ja miten palamurtuminen voi tapahtua eri osissa.



Kuva 15. Esimerkkimurtumismallit keski- ja poskilevyillä.

#### 4.6.2 Laskenta

Jokaiselle palamurtumismallille lasketaan arvo kaavalla

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_{u,l} \times A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{f_{y,l} \times A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

(SFS-EN 1993-1-8, 34).

Murtumistapaa 3 mitoitettaessa on otettava huomioon, että kaavasta saatua kestävyyttä tulee verrata yhden ruuvin levyllä aiheuttamaan voimaan. Lisäksi laskettaessa murtumistapaa 1 kaava sievenee muotoon  $V_{1,Rd} = \frac{f_{u,l} \times A_{nt}}{\gamma_{M2}}$ , koska leikkauskestävyyden  $A_{nv}$  pinta-alaa ei ole.

Vetokestävyydelle määritetään arvo kahdesta kaavasta sen mukaan, kumpi on pienempi. Nämä ovat nettopoikkileikkauksen kestävyuden mitoitusarvo

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_{u,l}}{\gamma_{M2}}$$

kiinnittimien reikien kohdalla ja bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen kestävyuden mitoitusarvo

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_{y,l}}{\gamma_{M0}}. \text{ (SFS-EN 1993-1-1, 52.)}$$

#### 4.7 Hitsit

Tässä osassa on kuvattu hitsin mitoitukseen liitoksessa tarvittavat lähtötiedot sekä hitsin kestävyuden laskenta. Teräslevyt voidaan kiinnittää toisiinsa hitsaamalla. Tässä tapauksessa teräsristikon alapaarre hitsataan kiinni keskilevyyn.

Hitsaussauman mitta eli palkopituus määräytyy sen mukaan, miten paljon keskilevyä on upotettu putkiprofiiliin sisään. Mitä paksumpaa hitsipalkoa hitsaaja tekee, sitä kestävämpi saumasta tulee. Nämä kaksi asiaa ovat oleelliset hitsiä mitoittaessa.

##### 4.7.1 Lähtötiedot

Teräsristikon putkiprofiili hitsataan pienahitsillä jatkoksen keskilevyyn. Laskentapohjaan syötetään hitsin a-mitta. Hitsin palkopituus määräytyy keskilevyn upotuspituuden mukaan. Näillä kahdella arvolla sekä putkiprofiilin ja keskilevyn lujuusluokalla voidaan laskea hitsin jännitys.

Jos putkipalkin ja keskilevyn lujuusluokka on eri, käytetään hitsin mitoituksessa pienemmän luokan arvoja. Hitsin lujuutta pienennetään korrelaatiokertoimella  $\beta_w$ , joka riippuu käytettävästä lujuusluokasta taulukon 4 mukaan.

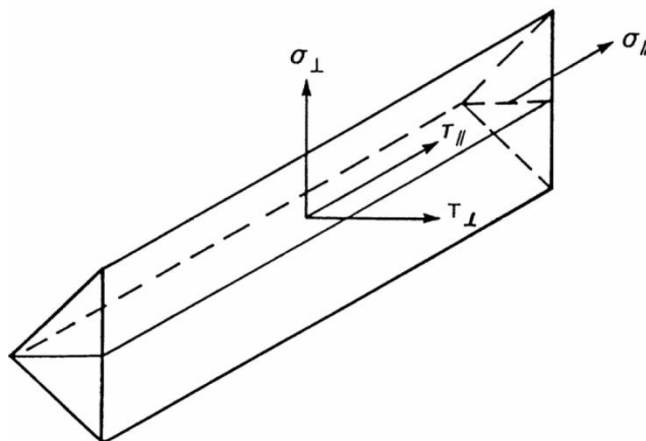
Taulukko 4. Hitsin korrelaatiokerroin  $\beta_w$  lujuuden mukaan.

Lujuusluokka	$\beta_w$
S235	0,8
S275	0,85
S355	0,9

Hitsin lähtöarvoja syötettäessä laskentapohja tarkistaa myös, että hitsi ei ylitä sallittua  $a$ -mittaa. Tämä lasketaan putkipalkin seinämän leikkauskestävyyden perusteella. Olisi vaarallista mitoittaa hitsi kestäväksi mutta jättää huomaamatta, että putkipalkin seinämä leikkaantuu upotussyvyydeltään irti putkipalkista.

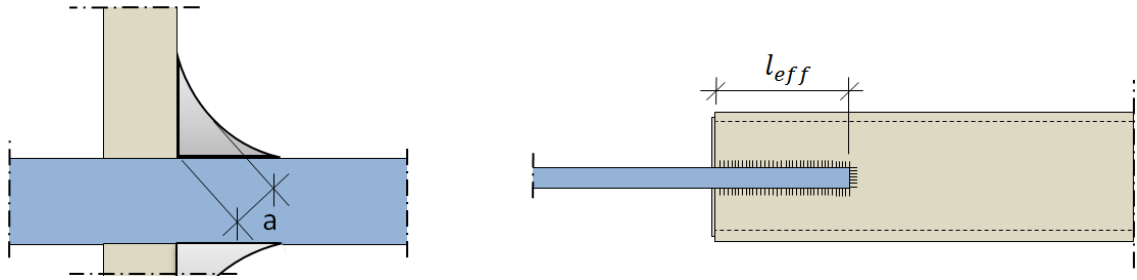
#### 4.7.2 Laskenta

Hitsin kestävyys lasketaan niin sanotulla komponenttimenetelmällä, jossa hitsin eri jännitykset jaetaan osiin (kuva 16). Koska liitokseen kohdistuu vain vetoa hitsin suuntaisesti, on hitsissä vallitseva jännitys ainoastaan hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys  $\tau_{||}$ .



Kuva 16. Hitsin komponenttimenetelmän jännitykset.

Hitsin pinta-ala lasketaan kertomalla  $a$ -mitta ja palkopituus  $l_{eff}$  (kuva 17). Koska liitoksessa on hitsipalkoja 4 kpl, kerrotaan saatu pinta-ala vielä neljällä. Hitsin pinta-alan mitoitusarvo  $A_w$  on siis  $A_w = \sum a \times l_{eff}$  (SFS-EN 1993-1-8, 46).



Kuva 17. Pienahitsin a-mitta ja efektiivinen pituus  $l_{eff}$ .

Jotta hitsin kestävyys olisi riittävä, on  $[\sigma_{\perp} + 3 \times (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}}$  ja  $\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \times f_u}{\gamma_{M2}}$  (SFS-EN 1993-1-8, 46). Koska hitsissä on ainoastaan akselin suuntaista leikkausjännitystä, toista kaavaa ei käytetä, ja ensimmäinen kaava sievenee muotoon  $\sqrt{3} \times \tau_{\parallel} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}}$ .

Hitsiin tuleva jännitys  $\tau_{\parallel}$  lasketaan jakamalla lähtötiedoissa annettu voima hitsin pinta-alalla  $A_w$ . Näin saadaan käyttöaste hitsille.

## 5 TESTAUKSEN PERIAATTEET

Jotta laskentapohjista saataisiin tarpeeksi luotettavat, on ne testattava järjestelmällisesti. Kun laskentapohjat on testattu, ne voidaan ottaa yritysten ja oppilaitosten käyttöön (P. Koponen, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2008). Laskentapohjien testauskoordinaattori Pekka Koponen on kirjoittanut laskentapohjien testausohjeen. Tässä luvussa tutustutaan hieman siihen, mitä testausohje pitää sisällään ja miten testauksen kulku menee.

### 5.1 Lähtötietojen raja-arvoanalyysi

Kaikki lähtöarvojen syötettävät arvot on testattava niin sanotulla raja-arvoanalyysillä. Syötettävät arvot ovat sellaisia, jotka suunnittelija syöttää vapaasti annettuun kenttään. Valittavia eli luokiteltuja lähtöarvoja ovat taas esimerkiksi lujuusluokka ja ruuvimäärät. Ne ovat suoraan Excelin pudotusvalikosta valittavia lähtöarvoja. (P. Koponen, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2008.)

Taulukko 5. Esimerkki luokitelluista ja syötettävistä lähtöarvoista.

Ruuvit							
Ruuvi		M20					
Halkisija		M12 M16 M20 M24 M30	mm				
Reiän koko Ø			mm				
Ruuvirivit			kpl				
Ruvisarakkeet		m = 3	kpl				
Määrä	Σ kpl	6 kpl					
Bruttoala	A =	314,16	mm <sup>2</sup>				
Jännityspoikkipinta-ala	A <sub>s</sub> =	245,00	mm <sup>2</sup>				

Putkipalkin koko	h x b x t <sub>2</sub> =	150	x	150	x	6
Levyn pituus	L =	500	mm			
Levyn paksuus	t <sub>1</sub> =	20	mm			
Levyn leveys	b <sub>1</sub> =	150	mm			
Upotuspituus	L <sub>1</sub> =	250	mm			

Raja-arvoanalyysillä varmistutaan siitä, että laskentapohjaan syötetään vain totuudellisia arvoja. Silloin poistuu kaikki miinusmerkkiset sekä nolllalla alkavat arvot, joita ei tässä ohjelmassa tarvita.

## 5.2 Tarkastusehtojen raja-arvoanalyysi

Tarkastusehtojen raja-arvoanalyysillä tarkistetaan, että tarkastusehdot eivät ole sallittujen rajojen ulkopuolella (P. Koponen, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2008). Tällaisia tarkistusehtoja ovat esimerkiksi hitsin maksimi-a-mitta, koska maksimi-a-mitta lasketaan putkipalkin seinämävahvuuden ja teräslaadun funktiona.

Muita tällaisia toisaalla olevia testitapauksia ovat reuna- ja keskiöetäisyydet, nurjahduspituus sekä levyjen poikkileikkausluokat.

## 5.3 Kombinaatiotestaus

Kombinaatiotestauksella tarkastetaan, että testauksella saataisiin laskentapohjan riittävän täydellinen haarauma- ja ehtokattavuus. Testaus suoritetaan karsitulla testausmenetelmällä, jossa poistetaan niin sanotut turhat vaihtoehdot pois (P. Koponen, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2008). Tällaiset ylimääräiset testitapaukset on jo käytännössä karsittu pois lähtötietojen raja-arvoanalyysissä.

Jos kaikki mahdolliset lähtöarvovaihtoehtojen yhdistelmät testattaisiin, seuraisi siitä testitapauksien määrän skaalautuminen kymmeniin miljooniin yhdistelmävaihtoehtoihin. Karsitulla kombinaatiotestauksella saavutetaan ehtojen osalta täysi haarauma- ja ehtokattavuus. (P. Koponen, henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2008.)

## 5.4 Testausprosessi

Koska testauksessa lasketaan satoja laskuja, on järkevää tehdä testausta varten jokaiselle mitoitusosa-alueelle oma Excel-pienpohja. Tähän pohjaan kirjaan testitapaukset sekä kaavat ylös. Kaavojen perusteella tehdään laskentapohjat kullekin laskulle. Laskujen tulee olla mahdollisimman selkeästi esitetty ja muotoiltu, jotta kokonaisuus laskusta ei hämärry.

Kun testitapaukset on suunniteltu ja taulukoitu, ne lasketaan aikaansaadulla pienohjelmistolla ja vastaukset kirjataan ylös. Tämän jälkeen tehdään sama toimenpide laskentapohjalle.



## 6 LASKENTAPOHJAN TESTAUS

### 6.1 Ruuvien leikkauskestävyys

Ohjelma varoittaa aina heti ”Lähtötiedot”-välilehdellä, kun lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä. Ruuvien leikkauskestävyyden analyysin yhteydessä tarkistettiin sallittujen keskiövälien minimi. Ohjelma ilmoitti oikein, mikäli keskiöväli ei ollut sallittu.

Taulukko 6. Ruuvien leikkauskestävyyden lähtöarvojen vaihtoehdot.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ruuvi	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
Leikkaustaso	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei	ei	ei	ei
Ruuvirivit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ruvisarakkeet	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Lujuusluokka	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
keskiöväli	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50

Testitapaus	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ruuvi	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
Leikkaustaso	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei	ei	ei	ei
Ruuvirivit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Ruvisarakkeet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lujuusluokka	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
keskiöväli	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50

Taulukossa 6 on kuvattu lähtöarvojen vaihtoehdot ruuvien leikkauskestävyyden tarkistukseen. Testitapauksia on 20 ja lähtöarvovaihtoehtoja on 12. Taulukkoon

7 on laskettu testitapausten perusteella vastaukset kunkin testitapausten yhdistelmään käsin ja ohjelmalla. Mikäli käsin laskettu arvo ja ohjelman vastaus ovat samat, testaus on onnistunut. Taulukon alaosassa on lyhyt yhteenveto ja selitys laskennasta.

Taulukko 7. Ruuvien leikkauskestävyyden tulokset.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus
1	598,9 kN	598,9 kN --> OK	11	674,4 kN	674,4 kN --> OK
2	2061,8 kN	2061,8 kN --> OK	12	2260,8 kN	2260,8 kN --> OK
3	4380,4 kN	4380,4 kN --> OK	13	4704,0 kN	4704,0 kN --> OK
4	7496,0 kN	7496,0 kN --> OK	14	7907,2 kN	7907,2 kN --> OK
5	12925,4 kN	12925,4 kN --> OK	15	13464,0 kN	13464,0 kN --> OK
6	3012,9 kN	3012,9 kN --> OK	16	2312,6 kN	2312,6 kN --> OK
7	5404,5 kN	5404,5 kN --> OK	17	3999,4 kN	3999,4 kN --> OK
8	7238,2 kN	7238,2 kN --> OK	18	5515,5 kN	5515,5 kN --> OK
9	7817,3 kN	7817,3 kN --> OK	19	6097,5 kN	6097,5 kN --> OK
10	6785,8 kN	6785,8 kN --> OK	20	5428,7 kN	5428,7 kN --> OK
Lopullinen tulos:			Onnistunut		
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ruuvien leikkauskestävyys OK. Ohjelma varoittaa, mikäli keskiöväli ei ole sallittu. Laskennan ruuveilla on aina 2 leikettä.				

## 6.2 Reunapuristuskestävyys

Ohjelma varoittaa aina heti "Lähtötiedot"-välilehdellä, kun lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä. Levyjen mittoja valittaessa ohjelma varoittaa, mikäli levyn poikkileikkausluokka on 4. Tässä ohjelmassa levyn PL-luokan tulee olla 1, 2 tai 3 laskennan yksinkertaistamiseksi. Levyjen PL-luokan laskennan tarkistus on toteutettu kohdassa 4.2 Toisaalla olevat testitapaukset.

Tässä ohjelmassa levyn paksuus  $t_1$  on rajattu 80 mm:iin. Kun levyn paksuus on yli 40 mm, teräksen lujuutta pienennetään. Mikäli ruuvirivejä on 1, reunaetäisyyttä  $e_2$  ei anneta, vaan ohjelma käyttää automaattisesti arvoa  $b/2$ . Keskiövälejä ei tällöin ole.

### 6.2.1 Keskilevy

Taulukossa 8 on kuvattu reunapuristuskestävyyden testauksen lähtöarvovaihtoehdot keskilevyllä. Testitapauksia on kymmenen ja lähtöarvovaihtoehtoja 13. Taulukkoon 9 on laskettu lähtöarvojen perusteella välitarkastusarvot  $k_1$  ja  $a_b$ , ja taulukossa 10 on testitapausten tulokset.

Taulukko 8. Reunapuristuskestävyyden lähtöarvovaihtoehdot keskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ruuvi =	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
Kierteet ei leik. tas.	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Ruuvirivit n =	1	2	3	4	5	6	7	8	7	7
Sarakkeet m =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Levyn teräs =	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235
Levyn pituus L =	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Levyn paksuus $t_1$ =	20	22	24	26	28	30	32	34	40	41
Levyn leveys $b_1$ =	100	150	200	260	300	340	400	440	450	560
Upotuspituus $L_1$ =	50	80	350	140	170	200	230	260	290	300
Päätyetäisyys $e_1$ =	20	40	30	34	40	30	25	30	33	40
Reunaetäisyys $e_2$ =	$b_1/2$	40	30	34	40	30	29	31	33	40
Keskiöväli $p_1$ =	-	50	50	60	75	50	40	50	60	75
Keskiöväli $p_2$ =	-	70	70	64	80	56	57	54	64	80

Taulukko 9. Välitarkistusarvot  $k_1$  ja  $a_b$  reunapuristuskestävyydessä keskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_1$ =	2,50	2,50	2,12	1,75	1,69	2,50	2,50	1,74	1,75	1,69
$a_b$ =	0,51	0,68	0,45	0,44	0,40	0,77	0,46	0,45	0,42	0,40

Taulukossa 10 on käsin lasketut sekä ohjelman laskema vastaus kestävydestä, ja alaosassa näkyy lyhyt yhteenveto ja selitys laskennasta. Jos testitapauksesta on ollut jotain huomautettavaa, se on kirjattu "Huom."-osaan taulukossa.

Taulukko 10. Reunapuristuskestävyyden tulokset keskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Huom.
1	88,6 kN	88,6 kN --> OK	Ohjelma varoittaa oikein (Levy liian lyhyt) Ohjelma varoittaa oikein (Levy ei tarpeeksi leveä) Ohjelma varoittaa oikein (Levy ei tarpeeksi leveä)
2	204,6 kN	204,6 kN --> OK	
3	188,6 kN	188,6 kN --> OK	
4	136,8 kN	136,8 kN --> OK	
5	197,8 kN	197,8 kN --> OK	
6	282,5 kN	282,5 kN --> OK	
7	170,7 kN	170,7 kN --> OK	
8	184,6 kN	184,6 kN --> OK	
9	500,0 kN	500,0 kN --> OK	
10	479,0 kN	479,0 kN --> OK	
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Reunapuristuskestävyys keskilevyllä OK. Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

### 6.2.2 Poskilevy

Poskilevyn mitoituksen tarkistus tapahtuu täysin samalla tavalla kuin keskilevyn. Lähtöarvovaihtoehdoista ainoastaan levyn paksuus on eri. Tuloksia vertailtaessa on otettava huomioon, että poskilevyn käyttöastetta määriteltäessä yhdelle poskilevyllä tuleva voima on puolet kokonaisvoimasta.

Taulukossa 11 on kuvattu reunapuristuskestävyyden lähtöarvovaihtoehdot ja taulukossa 12 on käsin lasketut välitarkastusarvot  $k_1$  ja  $a_b$  taulukoituna.

Taulukko 11. Reunapuristuskestävyyden lähtöarvovaihtoehdot poskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ruuvi =	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
Kierteet ei leik. tas.	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Ruuvirivit n=	1	2	3	4	5	6	7	6	6	5
Ruuvisarakeet m=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Levyn teräs=	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235
Levyn pituus L=	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Levyn paksuus t <sub>3</sub> =	11	14	17	20	31	27	29	32	38	40
Levyn leveys b <sub>1</sub> =	150	180	210	260	400	300	330	360	390	420
Upotuspituus L <sub>1</sub> =	50	80	100	140	170	200	230	260	290	300
Päätyetäisyys e <sub>1</sub> =	20	40	35	34	40	25	25	30	35	46
Reunaetäisyys e <sub>2</sub> =	b <sub>1</sub> /2	40	35	34	40	25	30	30	35	46
Keskiöväli p <sub>1</sub> =	-	50	50	60	75	50	40	60	60	80
Keskiöväli p <sub>2</sub> =	-	90	70	64	80	50	45	60	64	82

Taulukko 12. Välitarkistusarvot k<sub>1</sub> ja a<sub>b</sub> reunapuristuskestävyydessä poskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k <sub>1</sub> =	2,50	2,50	2,50	1,75	1,69	2,50	1,80	2,12	1,75	1,78
a <sub>b</sub> =	0,51	0,68	0,51	0,44	0,40	0,64	0,46	0,45	0,45	0,46

Taulukko 13. Reunapuristuskestävyyden tulokset poskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Huom.
1	48,7 kN	48,7 kN --> OK	Ohjelma varoittaa oikein (Levyn PL oltava 1/2/3)
2	130,2 kN	130,2 kN --> OK	
3	176,0 kN	176,0 kN --> OK	
4	105,2 kN	105,2 kN --> OK	
5	219,0 kN	219,0 kN --> OK	
6	211,8 kN	211,8 kN --> OK	
7	111,4 kN	111,4 kN --> OK	
8	212,0 kN	212,0 kN --> OK	
9	291,5 kN	291,5 kN --> OK	
10	285,6 kN	285,6 kN --> OK	
Lopullinen tulos:			Onnistunut
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Reunapuristuskestävyys poskilevyille OK. Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

Taulukossa 13 on käsin lasketut sekä ohjelman laskema vastaus kestävydestä ja alaosassa on lyhyt yhteenveto ja selitys laskennasta. Jos testitapauksesta on ollut jotain huomautettavaa, se on kirjattu ”Huom.”-osaan taulukossa.

### 6.3 Palamurtuminen ja vetokestävyys

Tässä osassa on kuvattu levyjen palamurtumisten ja vetokestävyysien tarkistukset. Murtumistavassa 3 on otettava huomioon, että murtumisvoima on yhdelle ruuville, ja käyttöastetta tarkasteltaessa sitä verrataan yhdelle ruuville tulevalle voimalle.

Vetokestävyys ja palamurtuminen on laskettu samaa lähtöarvotaulukkoa käyttämällä. Mikäli käsin lasketut tulokset ja ohjelman vastaus ovat samat, on testaus onnistunut.

#### 6.3.1 Keskilevy

Taulukossa 14 on keskilevyn palamurtumisen ja vetokestävyiden lähtöarvovaihtoehdot taulukoituna. Lähtöarvoja on jokaiselle kymmenelle testitapaukselle 12 kappaletta.

Taulukko 14. Pala- ja vetomurtumisen lähtöarvovaihtoehdot keskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Voima (kN)=	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Ruuvi=	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
kierteet ei leik. tas.	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Levyn teräs=	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235
Päätyetäisyys $e_1$ =	40	60	60	34	40	16	22	116	40	55
Reunaetäisyys $e_2$ =	$b_1/2$	60	50	34	40	16	22	116	40	55
Keskiöväli $p_1$ =	-	100	70	64	80	30	100	50	60	80
Keskiöväli $p_2$ =	-	100	70	64	100	134	138	54	70	90
Levyn leveys $b_1$ =	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
Levyn paksuus $t_1$ =	20	22	24	26	28	30	32	34	36	40
Ruuvirivit $n$ =	1	2	3	4	3	3	3	3	5	4
Ruvisarakkeet $m$ =	1	2	3	4	5	6	3	5	9	10

Taulukossa 15 on palamurtumisen tarkistuksen tulos ja taulukossa 15 vetomurtumisen tulos. Taulukoissa 15 ja 16 on käsin lasketut sekä ohjelman laskemat vastaukset kunkin testitapauksen kestävyydestä, ja alaosassa on lyhyt yhteenveto ja selitys laskennasta.

Taulukon 15 ”Huom.”-osaan on kirjattu murtumistapa liitokselle, kun taas taulukossa 16 on esitetty liitoksen murtumistapa, eli onko liitos hauras vai sitkeä.

Taulukko 15. Palamurtumisen tulokset keskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Huom.
1	181,8 kN	181,8 kN --> OK	Murtumistapa 2
2	1392,5 kN	1392,5 kN --> OK	Murtumistapa 1
3	1703,8 kN	1703,8 kN --> OK	Murtumistapa 1
4	1168,1 kN	1168,1 kN --> OK	Murtumistapa 1
5	1743,4 kN	1743,4 kN --> OK	Murtumistapa 1
6	174,7 kN	174,7 kN --> OK	Murtumistapa 3 (yhdelta ruuville)
7	176,2 kN	176,2 kN --> OK	Murtumistapa 3 (yhdelta ruuville)
8	3091,4 kN	3091,4 kN --> OK	Murtumistapa 2
9	3378,2 kN	3378,2 kN --> OK	Murtumistapa 1
10	2857,0 kN	2857,0 kN --> OK	Murtumistapa 1
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

Taulukko 16. Vetomurtumisen tulokset keskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Keskilevyn murtumistapa on:
1	940,0 kN	940,0 kN --> OK	Hauras
2	1253,3 kN	1253,3 kN --> OK	Hauras
3	1533,4 kN	1533,4 kN --> OK	Hauras
4	1051,3 kN	1051,3 kN --> OK	Hauras
5	1569,1 kN	1569,1 kN --> OK	Hauras
6	2875,2 kN	2875,2 kN --> OK	Hauras
7	2206,3 kN	2206,3 kN --> OK	Hauras
8	2884,2 kN	2884,2 kN --> OK	Hauras
9	3040,4 kN	3040,4 kN --> OK	Hauras
10	2571,3 kN	2571,3 kN --> OK	Hauras
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		



### 6.3.2 Poskilevy

Taulukossa 17 on keskilevyn palamurtumisen ja vetokestävyyden lähtöarvovaihtoehdot taulukoituna. Lähtöarvoja on jokaiselle kymmenelle testitapaukselle 12 kappaletta.

Taulukko 17. Pala- ja vetomurtumisen lähtöarvovaihtoehdot poskilevyllä.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Voima (kN)=	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Ruuvi=	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20	M24	M30
kierteet ei leik. tas.	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Levyn teräs=	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235
Päätyetäisyys $e_1$ =	40	60	60	34	40	16	22	116	40	55
Reunaetäisyys $e_2$ =	$b_1/2$	60	50	34	40	16	22	116	40	55
Keskiöväli $p_1$ =	-	100	70	64	80	30	100	50	60	80
Keskiöväli $p_2$ =	-	100	70	64	100	134	138	54	70	90
Levyn leveys $b_1$ =	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
Levyn paksuus $t_3$ =	20	22	24	26	28	30	32	34	36	40
Ruuvirivit $n$ =	1	2	3	4	3	3	3	3	5	4
Ruvisarakkeet $m$ =	1	2	3	4	5	6	3	5	9	10

Taulukossa 18 on palamurtumisen tarkistuksen tulos ja taulukossa 18 vetomurtumisen tulos. Taulukoissa 18 ja 19 on käsin lasketut sekä ohjelman laskemat vastaukset kunkin testitapauksen kestävydestä, ja alaosassa on lyhyt yhteenveto ja selitys laskennasta.

Taulukon 18 ”Huom.”-osaan on kirjattu murtumistapa liitokselle, kun taas taulukossa 19 on esitetty liitoksen murtumistapa, eli onko liitos hauras vai sitkeä.

Taulukko 18. Palamurtumisen tulokset poskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Huom.
1	181,8 kN	181,8 kN --> OK	Murtumistapa 2
2	1392,5 kN	1392,5 kN --> OK	Murtumistapa 1
3	1703,8 kN	1703,8 kN --> OK	Murtumistapa 1
4	1168,1 kN	1168,1 kN --> OK	Murtumistapa 1
5	1743,4 kN	1743,4 kN --> OK	Murtumistapa 1
6	174,7 kN	174,7 kN --> OK	Murtumistapa 3 (yhdele ruuville)
7	176,2 kN	176,2 kN --> OK	Murtumistapa 3 (yhdele ruuville)
8	3091,4 kN	3091,4 kN --> OK	Murtumistapa 2
9	3378,2 kN	3378,2 kN --> OK	Murtumistapa 1
10	2857,0 kN	2857,0 kN --> OK	Murtumistapa 1
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

Taulukko 19. Vetomurtumisen tulokset poskilevyllä.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Poskilevyn murtumistapa on:
1	940,0 kN	940,0 kN --> OK	Hauras
2	1253,3 kN	1253,3 kN --> OK	Hauras
3	1533,4 kN	1533,4 kN --> OK	Hauras
4	1051,3 kN	1051,3 kN --> OK	Hauras
5	1569,1 kN	1569,1 kN --> OK	Hauras
6	2875,2 kN	2875,2 kN --> OK	Hauras
7	2206,3 kN	2206,3 kN --> OK	Hauras
8	2884,2 kN	2884,2 kN --> OK	Hauras
9	3040,4 kN	3040,4 kN --> OK	Hauras
10	2571,3 kN	2571,3 kN --> OK	Hauras
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

## 6.4 Hitsi

Tässä osassa on kuvattu hitsin testaus. Hitsi testataan komponenttimenetelmällä, jossa hitsiin kohdistuvat voimat jaetaan osiin, eli komponentteihin.

Jos hitsin palkopaksuus eli a-mitta on liian suuri verrattuna putkiprofiilin seinämävahvuuteen, putkiprofiilin seinä repeytyisi vaikka hitsi kestäisikin. Tästä johtuen ohjelma laskee hitsille myös maksimi-a-mitan, joka perustuu putkiprofiilin ja levyn vahvuuksiin. Pienahitsin minimi-a-mitta on 3 mm:ä, joten se on myöskin otettu huomioon tarkistuksessa.

Taulukossa 20 on taulukoituna 6 testitapausta, jossa jokaisella on 6 lähtöarvovaihtoehtoa. Taulukossa 21 on kuvattuna testaustulokset. Mikäli käsin laskettu ja ohjelmasta saatu vastaus ovat samat, testaus on onnistunut.

Taulukko 20. Lähtöarvovaihtoehdot hitsin tarkistukseen.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6
Voima (kN)=	200	300	400	500	600	700
Keskilevyn teräs=	S235	S275	S355	S235	S275	S355
Putkipalkin teräs=	S235	S355	S235	S275	S355	S355
Hitsin palkopituus=	100	150	200	250	300	350
Palkin seinämä $t_2$ =	5	6	7	4	9	10
a-mitta=	2	3	4	5	6	7

Taulukko 21. Hitsin tulokset.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Huom.
1	433,0 N/mm <sup>2</sup>	433,0 N/mm <sup>2</sup>	OK. Ohjelma varoittaa oikein (a-mitta alle min.)
2	288,7 N/mm <sup>2</sup>	288,7 N/mm <sup>2</sup>	OK
3	216,5 N/mm <sup>2</sup>	216,5 N/mm <sup>2</sup>	OK
4	173,2 N/mm <sup>2</sup>	173,2 N/mm <sup>2</sup>	OK. Ohjelma varoittaa oikein (a-mitta yli maks.)
5	144,3 N/mm <sup>2</sup>	144,3 N/mm <sup>2</sup>	OK
6	123,7 N/mm <sup>2</sup>	123,7 N/mm <sup>2</sup>	OK
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

## 6.5 Kombinaatiotestaus

Koska Alapäärjatkos-ohjelma on luonteeltaan yksinkertainen, päätettiin kombinaatiotestausta soveltaa. Ohjelmassa ei ole pitkiä testaussarjoja, joita pitäisi testata yhdessä, vaan pieniä rakenneosia. Ohjelma antaa kustakin osasta oman käyttöasteen, ja näistä suurin käyttöaste on määräävä. Käytännössä nämä osat on jo testattu osassa 3, mutta kokonaiskuvan ja toiminnan varmistamiseksi tehdään vielä suurempi testausarja, johon sisältyy kaikki mahdolliset lähtöarvo- ja valintaruudut, jotta mitään ei jäisi huomaamatta.

Taulukossa 22 on kuvattuna lähtöarvovaihtoehdot kombinaatiotestaukselle. Kaikille kahdeksalle testitapaukselle on kullekin 22 lähtöarvovaihtoehtoa, jotka ohjelman käyttäjä syöttää laskentapohjalle.

Taulukossa 23 on kombinaatiotestauksen vaihtoehdoista käsin lasketut käyttöasteet, ja taulukossa 24 on puolestaan ohjelman antamat käyttöasteet. Liitoksen kokonaiskäyttöasteet ovat taulukossa 25, josta löytyy myös testauksen tulos. Kokonaiskäyttöaste määräytyy suurimman yksittäisen käyttöasteen perusteella.

Taulukossa 25 on myös kuvattu liitoksen murtumistapa. Tästä voidaan havaita, että hitsi ja ruuvien leikkauskestävyys muodostuvat yleensä määrääväksi tekijäksi liitosta mitoitettaessa.

Taulukko 22. Lähtöarvovaihtoehdot kombinaatiotestaukseen.

Testitapaus	1	2	3	4	5	6	7	8
Voima (kN)=	50	700	1350	2000	2650	3300	3950	4600
Ruuvi=	M12	M16	M20	M24	M30	M12	M16	M20
Ruuvirivit n=	1	2	3	3	4	5	8	10
Ruuvisarakeet m=	1	2	3	4	5	7	9	10
Lujuusluokka=	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	10.9	10.9	10.9
Leikkaustaso=	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä	ei	ei
Putkipalkin teräs=	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235	S275
Keskilevyn teräs=	S235	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S235
Putkipalkin h=	100	150	200	250	300	350	400	450
Putkipalkin b=	100	150	200	250	300	350	400	450
Putkipalkin t=	5	6	8	10	12	14	16	18
Levyn pituus L=	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700
Levyn paksuus $t_1$ =	15	23	31	39	47	55	63	80
Levyjen leveys $b_1$ =	150	200	250	300	350	400	450	800
Upotuspituus $L_1$ =	50	150	250	350	450	550	650	900
Poskilevyjen teräs=	S235	S235	S275	S355	S235	S275	S355	S355
Levyn paksuus $t_3$ =	12	16	20	24	28	32	36	60
a-mitta=	3	4	5	6	7	7	8	7
Päätyetäisyys $e_1$ =	40	50	50	50	55	40	32	40
Reunaetäisyys $e_2$ =	75	50	50	50	55	40	32	40
Keskiöväli $p_1$ =	-	100	75	100	80	80	55	80
Keskiöväli $p_2$ =	-	100	75	100	80	80	55	80

Taulukko 23. Kombinaatiotestauksen käsin lasketut käyttöasteet.

Käyttöaste	1	2	3	4	5	6	7	8
Ruuvien leikkauskestävyys=	77 %	145 %	80 %	61 %	24 %	160 %	30 %	17 %
Keskilevyn Reunapuristus=	64 %	71 %	37 %	27 %	35 %	17 %	10 %	7 %
Keskilevyn palamurtuminen=	37 %	64 %	69 %	57 %	90 %	55 %	54 %	34 %
Keskilevyn vetokestävyys=	9 %	72 %	76 %	63 %	100 %	61 %	61 %	38 %
Poskilevyjen reunapuristus=	40 %	51 %	29 %	22 %	29 %	14 %	8 %	3 %
Poskilevyjen palamurtuminen=	23 %	46 %	53 %	46 %	75 %	45 %	44 %	18 %
Poskilevyjen vetokestävyys=	6 %	51 %	59 %	51 %	84 %	50 %	49 %	20 %
Hitsi=	40 %	140 %	116 %	115 %	101 %	92 %	91 %	88 %
MÄÄRÄÄVÄ=	77 %	145 %	116 %	115 %	101 %	160 %	91 %	88 %

Taulukko 24. Kombinaatiotestauksen ohjelman laskemat käyttöasteet.

Käyttöaste	1	2	3	4	5	6	7	8
Ruuvien leikkauskestävyys=	77 %	145 %	80 %	61 %	24 %	160 %	30 %	17 %
Keskilevyn Reunapuristus=	64 %	71 %	37 %	27 %	35 %	17 %	10 %	7 %
Keskilevyn palamurtuminen=	37 %	64 %	69 %	57 %	90 %	55 %	54 %	34 %
Keskilevyn vetokestävyys=	9 %	72 %	76 %	63 %	100 %	61 %	61 %	38 %
Poskilevyjen reunapuristus=	40 %	51 %	29 %	22 %	29 %	14 %	8 %	3 %
Poskilevyjen palamurtuminen=	23 %	46 %	53 %	46 %	75 %	45 %	44 %	18 %
Poskilevyjen vetokestävyys=	6 %	51 %	59 %	51 %	84 %	50 %	49 %	20 %
Hitsi=	40 %	140 %	116 %	115 %	101 %	92 %	91 %	88 %
MÄÄRÄÄVÄ=	77 %	145 %	116 %	115 %	101 %	160 %	91 %	88 %

Taulukko 25. Kombinaatiotestauksen kokonaiskäyttöasteet.

Testitapaus	Käsin laskettu	Ohjelman vastaus	Liitoksen murtumistapa:
1	77 %	77 % OK	Ruuvien leikkauskestävyys
2	145 %	145 % OK	Ruuvien leikkauskestävyys
3	116 %	116 % OK	Hitsi
4	115 %	115 % OK	Hitsi
5	101 %	101 % OK	Hitsi
6	160 %	160 % OK	Ruuvien leikkauskestävyys
7	91 %	91 % OK	Hitsi
8	88 %	88 % OK	Hitsi
<b>Lopullinen tulos:</b>			<b>Onnistunut</b>
Suorituksen tai tuloksen selitys:	Ohjelma varoittaa oikein, jos lähtöarvot eivät ole sallittujen rajojen sisällä.		

## 6.6 Testauksen yhteenveto

Laskentapohjan varmennustestauksessa käytiin läpi käsin laskien kaikki mahdolliset laskentatapaukset. Käsin lasketut tulokset kirjattiin ylös kustakin testitapauksesta ja niitä verrattiin laskentapohjan antamiin vastauksiin.

Lähtötietojen raja-arvoanalyysin testitapauksia oli yhteensä 86 kappaletta, tarkastusehtojen raja-arvoanalyysin testitapauksia oli neljä kappaletta ja kombinaatiotestauksen testitapauksia oli kahdeksan kappaletta. Näistä jokainen testitapaus oli onnistunut. Voidaan siis todeta, että alapaarreja koskevat laskentapohjan version 1.0 laskenta ja mitoitus tapahtuvat laskentateorioiden ja -perusteiden mukaisesti oikein.

Laskentapohjan kattavuus tarkistettiin 1.11.2012–16.11.2012, laskentapohjan oikeellisuuden varmennustestit suunniteltiin 17.11.2012–17.12.2012 ja laskentapohjan oikeellisuuden varmennustestit suoritettiin 7.1.2013–24.1.2013.

## 7 TESTAUKSEN LUOTETTAVUUS

Vaikka laskentapohjalle tehdään varmennustestaus, se ei silti ole välttämättä virheetön. Inhimillisen erehdyksen vaara on aina olemassa. Inhimillisten erehdysten takia testauksen laskelmat on suoritettu kahteen ja tarvittaessa kolmeen kertaan.

Laskentapohjasta on pyritty tekemään mahdollisimman yksinkertainen ja käyttäjäystävällinen. Tällä tavoin pyritään välttämään suunnittelijan syöttämät virheelliset lähtöarvot sekä ohjaamaan suunnittelijaa ymmärtämään, mitä hän laskee. Testauksella ei kuitenkaan pyritä tarkistamaan käyttäjäystävällisyyttä, vaan toiminnan ja laskennan oikeellisuutta. Testaaja on kuitenkin velvollinen kertomaan ohjelman toteuttajalle, mikäli tämä löytää mahdollisten väärinymmärrysten aiheuttavia ohjeita tai kuvia.

Laskentapohjat testataan kattavasti ja järjestelmällisesti. Varmennustestausraportti lähetetään laskentapohjan mukana sitä käyttävälle yritykselle tai oppilaitokselle. Laskentapohjaa käyttävät tahot käyvät läpi raportin, jotta he voivat vakuuttua pohjan toiminnasta ja oikeellisuudesta. Tämän jälkeen yksittäinen käyttäjä tekee oman analyysinsä testauksen luotettavuudesta. Käyttäjät voivat tehdä omalla vastuullaan muutoksia laskentapohjaan, mikäli katsovat sen parantavan juuri heidän tavoitteitaan laskentapohjan laskennan suhteen. Tämä tapahtuu kuitenkin heidän omalla vastuullaan.

Vaikka ohjelma on varmennustestauksen läpäissyt, ei varmennustestaaja tai ohjelman koodaaja ota vastuuta mahdollisista ohjelman virheistä tai mitoitusvirheistä. Ohjelman käyttäjä on aina ensisijaisesti vastuussa ohjelman käytöstä.



## 8 LASKENTAPOHJAN KORJAUKSET

Laskentapohjaan tuli yhteensä 6 korjausta ja muutosta. Näistä yksi oli niin sanottu kriittinen virhe, josta olisi voinut laskennassa syntyä vaaratilanne. Loput muutokset olivat enemmänkin muutosta visuaaliseen ulkoasuun, joilla avustetaan käyttäjää mitoittamaan paremmin sekä nopeammin. Testauksen aikana päätettiin myös lisätä laskentapohjaan selventävä kuva, josta käy nopeasti ilmi ruuvirivien ja -sarakkeiden järjestys laskentapohjassa. Laskentapohjahankkeen edellytyksiin kuuluu, että suunnittelijan on ymmärrettävä laskentapohjan toiminta oikein.

Kriittinen virhe löytyi ”Laskenta”-välilehdeltä, jossa poskilevyn lujuustietoja oli linkitetty keskilevyn lujuustietoihin ”Lähtötiedot”-välilehdelle. Virhe löydettiin aivan testauksen loppuvaiheessa, vaikka tätä käytännössä oli testattu moneen kertaan. Tämä johtui siitä, että testauksen aikana oli pääsääntöisesti aina käytetty samoja lujuusluokkia keskilevyn ja poskilevyjen välillä. Näin laskettaessa olisi linkitysvirhe voinut jäädä kokonaan huomaamatta.

Muita hyväksi katsottuja muutoksia laskentapohjaan tehtiin yhdessä laskentapohjan valmistajatahon kanssa. Tällaisia muutoksia oli esimerkiksi mitoitusohjeiden lisääminen sekä huonoista ratkaisuksista varoittaminen. Myös laskentaa helpottavia lisäyksiä lisättiin laskentapohjaan.

Liitteistä löytyvät ohjelman yleinen ulkoasu sekä tulostettava ulkoasu ”Lähtötiedot”- ja ”Tulos”-välilehdiltä.

Muutosten jälkeen tehtiin laskentapohjaan niin sanottu regressiotestaus, jolla todettiin muutosten jälkeen laskentapohjan toimivuus. Aina, kun koodia muutetaan, se voi vaikuttaa pohjan toimintaan. Regressiotestauksella pyritään eliminomaan tämä virheen mahdollisuus.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa SKOL:n eurokoodimitoitukseen perustuvan laskentapohjahankkeen alapaarrejaatkoksen varmennustestaus. Työn tuloksena syntyi varmennustestausraportti, joka lähetettiin laskentapohjan valmistajalle.

Varmennustestauksen aikana tutustuttiin ja perehdyttiin SFS:n julkaisemiin eurokoodistandardi EN 1993 Teräsrakenteet opastuskirjojen osiin 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt ja 1-8 Liitosten suunnittelu. Näiden ohella käytiin alapaarrejaatko-laskentapohjan laskentakaavat ja toiminta perusteellisesti läpi. Varmennustestauksessa käytiin jokainen laskentavaihe osalta läpi, jolloin saavutettiin vaadittava ohjelman luotettavuus.

Testauksen yhteydessä korjattiin laskentapohjasta yksi kriittinen virhe, joka olisi voinut ilman korjausta aiheuttaa vakavia laskentavirheitä. Testauksen aikana yhteistyönä laskentapohjan valmistajatahon kanssa parannettiin laskentapohjan käyttöä ja lisättiin pohjaan suunnitteluohjeita ja suosituksia.

Testauksessa olisi syytä olla mukana useampi testaaja, koska se osaltaan parantaisi inhimillisten erehdysten ilmenemismahdollisuutta. Laskentapohjassa on myös muutamia tulkinnanvaraisia kohtia, joihin olisi laajemmalla testauskapasiteetilla paremmat resurssit perehtyä.

Varmennustestaus osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi työksi, sillä testauksen aikana pääsi hyvin sisälle eurokoodimitoitukseen käytännössä. Tämä työ osoittautui hyväksi jatkoksi koulussa opitun teoreettisen laskennan rinnalle.

Tämä laskentapohja julkaistiin 29.1.2013, ja se on kaikkien hankeosapuolien käytettävissä. Laskentapohjahankkeeseen kuuluvat yritykset ja oppilaitokset voivat ladata laskentapohjan SKOL:n internetsivuilta. (SKOL 2013.)

## LÄHTEET

Eurokoodi help desk 2012. Eurokoodi help desk. Viitattu 29.1.2013  
<http://www.eurocodes.fi/index.htm>.

Koponen, P. 2009. SKOL-hankkeen ohjelmat. Viitattu 29.1.2013  
[http://www.skolry.fi/easydata/customers/skolry/files/eurokoodit/SKOL-hankkeen\\_ohjelmat.pdf](http://www.skolry.fi/easydata/customers/skolry/files/eurokoodit/SKOL-hankkeen_ohjelmat.pdf).

Rautaruukki Oy 2012. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj.

SFS-EN 1993-1-8 Liitosten suunnittelu. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.


SFS-EN 1993-1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SKOL 2008. Eurocode-laskentapohjien laadintahanke-Hankkeen yleisohje. Viitattu 29.1.2013  
[http://www.skolry.fi/easydata/customers/skolry/files/toimialat/0\\_Hankkeen\\_yleisohje\\_v12.doc](http://www.skolry.fi/easydata/customers/skolry/files/toimialat/0_Hankkeen_yleisohje_v12.doc).

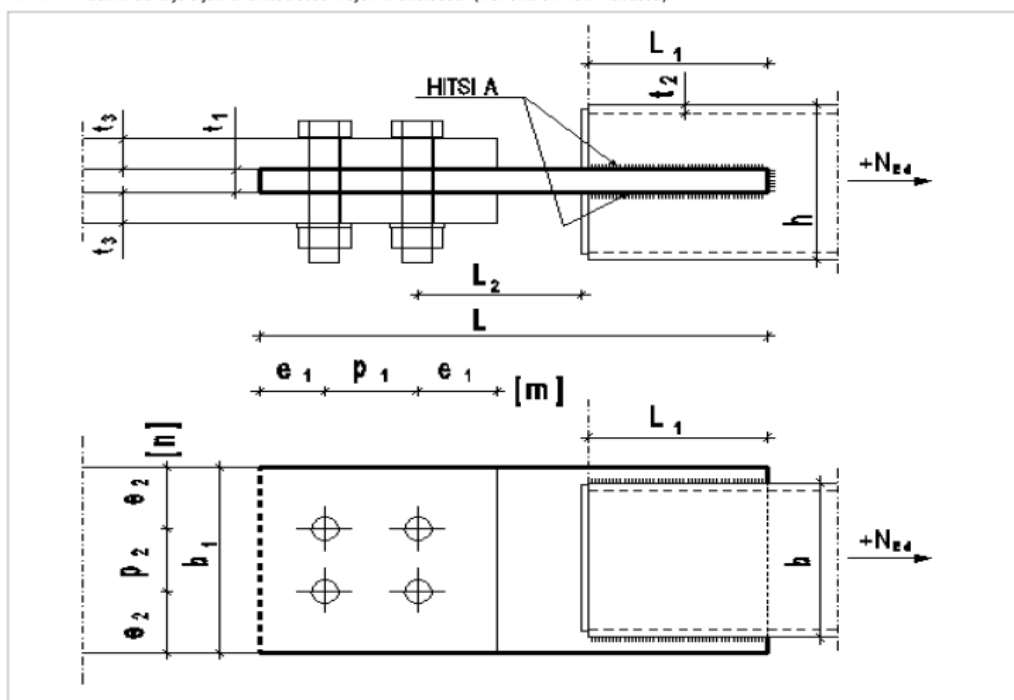
SKOL 2013. Eurocode-laskentapohjat. Viitattu 14.2.2013  
[http://www.skolry.fi/toiminta/tutkimus\\_ja\\_kehitys/eurocode-laskentapohjat](http://www.skolry.fi/toiminta/tutkimus_ja_kehitys/eurocode-laskentapohjat).

Ympäristöministeriö 2012. Rakentamismääräykset ja eurokoodisuunnittelu. Viitattu 29.1.2013  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=136425&lan=fi>.

# Laskentapohjan ”Lähtötiedot”-välilehti

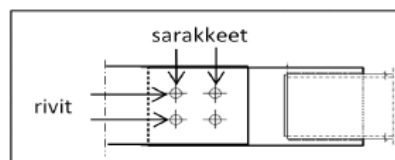
		Rakennelaskelma, lähtötiedot	
		Tekijä: Wise Group	Sivu: 1 (2)
Rakennuskohde:		Työ no	Sisältö:
SKOL-OHJELMAPOHJA : ver. 1.0		00003	LIITOS:R-x ALAPAARREJATKOS
HFRHS, CFCHS putkipalkkiristikon ALAPAARREJATKOS: SFS-EN-1993		Sijainti: C/1	
Lähtötiedot:			

Kuva 1. Ruuvimäärä ja sijainti lähtötietoarvojen mukaisesti. (Voi olla eri kuin kuvassa)



Kuorma	
$N_{Ed}$	500 kN
Laskenta koskee poikkileikkausluokkia 1, 2 ja 3.	
Ruuvit	
Ruuvi	M20
Halkisija	$d = 20$ mm
Reiän koko $\varnothing$	$d_0 = 22$ mm
Ruuvirivit	$n = 2$ kpl
Ruovisarakeet	$m = 3$ kpl
Määrä	$\Sigma$ kpl 6 kpl
Bruttoala	$A = 314,16$ mm <sup>2</sup>
Jännityspoikkipinta-ala	$A_s = 245,00$ mm <sup>2</sup>
Lujuusluokka (s.21 3.1)	8.8
$f_{yb} =$	640 N/mm <sup>2</sup>
$f_{ub} =$	800 N/mm <sup>2</sup>
$\alpha_v =$	0,6
Sijaitseeko kierre leikkaustasossa?	kyllä
$A_s =$	245,00 mm <sup>2</sup>

Suunnittelija täyttää



**Teräs EN 10025-2 tai vastaava**

Putkipalkki

S355

$$f_{yp} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{up} = 510 \text{ N/mm}^2$$

Keskilevy

S355

$$f_{yl} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ul} = 510 \text{ N/mm}^2$$

Putkipalkin koko

$$h \times b \times t_2 = 150 \times 150 \times 6$$

Levyn pituus

$$L = 500 \text{ mm}$$

Levyn paksuus

$$t_1 = 20 \text{ mm}$$

Levyn leveys

$$b_1 = 150 \text{ mm}$$

Upotuspituus

$$L_1 = 250 \text{ mm}$$

Nurjahduspituus

$$L_2 = 55 \text{ mm}$$

Levyn poikkileikkausluokka

2

Poskilevyt

S355

$$f_{yl} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ul} = 510 \text{ N/mm}^2$$

Levyn paksuus

$$t_3 = 15 \text{ mm}$$

Levyn poikkileikkausluokka

3

**Hitsi A:**

$$a\text{-mitta} = 4 \text{ mm}$$

$$\text{Maksimi } a\text{-mitta} = 4,6 \text{ mm}$$

$$\text{Hitsin palkopituus (=L}_1\text{)} = 250 \text{ mm}$$

**Minimiarvot reunaetäisyyksille (taul. 3.3 s.24)**

$$\text{Päätyetäisyys } e_1 = 1,2 \cdot d_0 = 26,4 \text{ mm}$$

$$\text{Reunaetäisyys } e_2 = 1,2 \cdot d_0 = 26,4 \text{ mm}$$

$$\text{Keskiöväli } p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 48,4 \text{ mm}$$

$$\text{Keskiöväli } p_2 = 2,4 \cdot d_0 = 52,8 \text{ mm}$$

**Reunaetäisyydet**

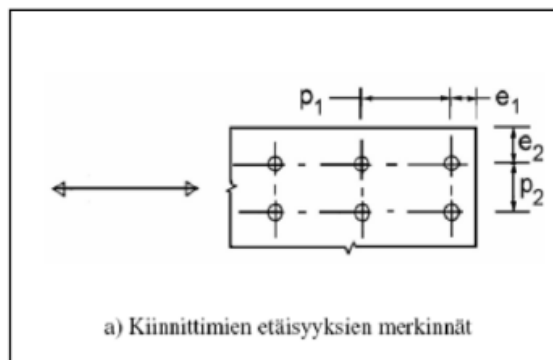
$$\text{Päätyetäisyys } e_1 = 35,0 \text{ mm}$$

$$\text{Reunaetäisyys } e_2 = 35,0 \text{ mm}$$

$$\text{Keskiöväli } p_1 = 80,0 \text{ mm}$$


$$\text{Keskiöväli } p_2 = 80,0 \text{ mm}$$

$$\text{Etäisyyksien } e_2 \text{ ja } p_2 \text{ summa} = 150 \text{ mm}$$



(SFS EN 1993-1-8 s.19 taul. 2.1)

# Laskentapohjan ”Tulos”-välilehti

		Rakennelaskelma, tulokset	
		Tekijä: Wise Group	s 1 (3)
Rakennuskohde:		Päiväys: 24.1.2013	
SKOL-OHJELMAPOHJA : ver. 1.0	Työ no: 00003	Sisältö: LIITOS:R-x ALAPAARREJATKOS	Sijainti: C/1
HFRHS, CFCHS putkipalkkiristikon ALAPAARREJATKOS: SFS-EN-1993			

## Lähtötiedot

$N_{Ed} = 500$  kN

## Ruuvit

Ruuvi		M20
Halkisija	d	20
Reiän koko	mm	22
Määrä	kpl	6
Ruuveja/rivi n kpl	n	2
Ruuvisarakkeet	m	3
Bruttoala	mm <sup>2</sup>	314,16
Jännityspoikkipinta-ala	mm <sup>2</sup>	245,00
Lujuusluokka		8.8
$f_{ub}$	N/mm <sup>2</sup>	800
$f_{yb}$	N/mm <sup>2</sup>	640
$\alpha_v$		0,6

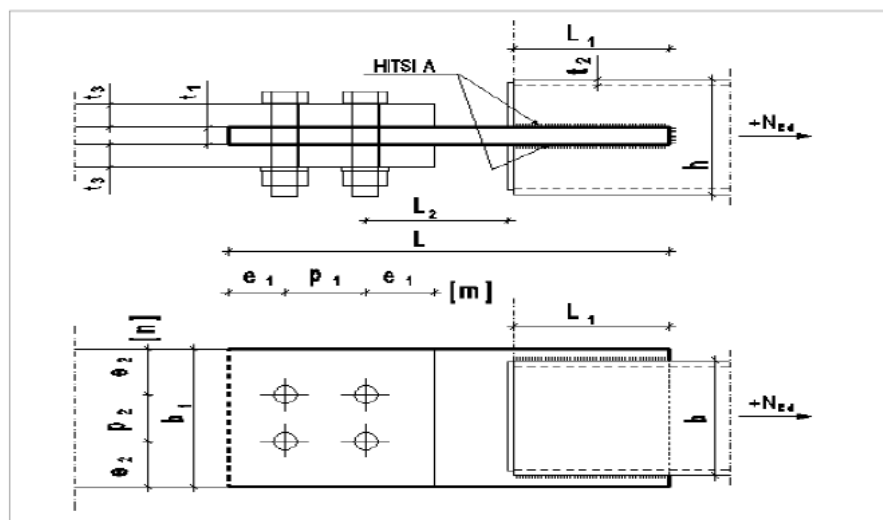
## Reunaetäisyydet


Päätyetäisyys	$e_1$	35
reunaetäisyys	$e_2$	35
Keskiöväli	$p_1$	80
Keskiöväli	$p_2$	80

## Teräs EN 10025-2 tai vastaava

<b>Putkipalkki</b>		S355
$f_{y,p}$	N/mm <sup>2</sup>	355
$f_{u,p}$	N/mm <sup>2</sup>	510
<b>Keskilevy</b>		S355
$f_{y,l}$	N/mm <sup>2</sup>	355
$f_{u,l}$	N/mm <sup>2</sup>	510
<b>Putkipalkin koko</b>		150 x 150 x 6
(Pyöreällä $b = D$ )	h	$b(D)$ x $t_2$
Levyn paksuus	$t_1$	20
Levyn leveys	$b_1$	150
Etäisyys	$L_2$	55
Upotuspituus	$L_1$	250
<b>Poskilevyt</b>		S355
$f_{y,l}$	N/mm <sup>2</sup>	355
$f_{u,l}$	N/mm <sup>2</sup>	510
Levyn paksuus	$t_3$	15
<b>Hitsi A</b>		
Hitsi A: a-mitta	mm	4
Hitsin palkopituus	$L_1$	250

Kuva 1. Ruuvimäärä ja sijainti lähtötietoarvojen mukaisesti. (Voi olla eri kuin kuvassa)



		<b>Rakennelaskelma, tulokset</b>	
		Tekijä: Wise Group	s 2 (3)
Päiväys: 24.1.2013			
Rakennuskohde:	Työ no:	Sisältö:	Sijainti:
SKOL-OHJELMAPOHJA : ver. 1.0	00003	LIITOS:R-x ALAPAARREJATKOS	C/1
<b>HFRHS, CFCHS putkipalkkiristikon ALAPAARREJATKOS: SFS-EN-1993</b>			
<b>Ruuvien leikkauskestävyys <math>F_{v,Rd}</math></b>			

$F_{v,Rd} = (\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s) / \gamma_{M2}$	6 kpl	M20	8.8	
Yhteensä	Kierre leikkaustasossa:			kyllä
$F_{v,Rd} =$	1129 kN	$\geq$	$V_{Ed} =$	500 kN
			OK	44 %

**KESKILEVYN MITOITUS**

<b>Reunapuristuskestävyys <math>F_{b,Rd}</math></b>
---

$F_{b,Rd} = (k_1 \cdot a_b \cdot f_{u,l} \cdot d \cdot t_1) / \gamma_{M2}$				
minimiarvon mukaan				
$F_{b,Rd} =$	216 kN / ruuvi	$\geq$	$F_{v,Ed} =$	83 kN / ruuvi
Kestävyys			Ulkoisen voima	OK 39 %

<b>Palamurtuminen <math>V_{eff,1,Rd}</math></b>
---

$$V_{eff,1,Rd} = f_{u,l} \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_{y,l} \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

**Murtumistapa 1**

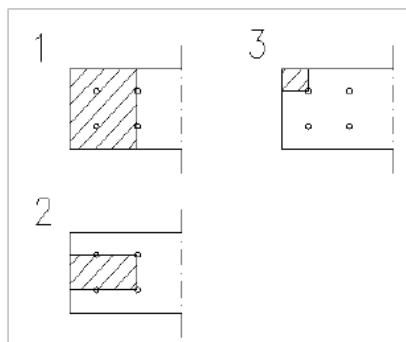
$V_{eff,1,Rd} =$	865 kN	$\geq N_{Ed} =$	500 kN	OK	58 %
------------------	--------	-----------------	--------	----	------


**Murtumistapa 2**

$V_{eff,1,Rd} =$	1621 kN	$\geq N_{Ed} =$	500 kN	OK	31 %
------------------	---------	-----------------	--------	----	------

**Murtumistapa 3**

$V_{eff,1,Rd} =$	294 kN	$\geq F_{v,Ed} =$	83 kN	OK	28 %
------------------	--------	-------------------	-------	----	------



		Rakennelaskelma, tulokset	
		Tekijä: Wise Group	s 3 (3)
		Päiväys: 24.1.2013	
Rakennuskohde:	Työ no: Sisältö:		Sijainti:
SKOL-OHJELMAPOHJA : ver. 1.0	00003 LIITOS:R-x ALAPAARREJATKOS		C/1
HFRHS, CFCFS putkipalkkiristikon ALAPAARREJATKOS: SFS-EN-1993			

#### keskilevyn vetokestävyys

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_{ul} / \gamma_{M2} = 778 \geq N_{Ed} = 500 \quad \text{OK} \quad 64 \%$$

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1065 \geq N_{Ed} = 500 \quad \text{OK} \quad 47 \%$$

#### POSKILEVYN MITOITUS

##### Reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$

$$F_{b,Rd} = (k_1 \cdot a_b \cdot f_{u,l} \cdot d \cdot t_1) / \gamma_{M2}$$

minimiarvon mukaan

$$F_{b,Rd} = 162 \text{ kN / ruuvi} \geq F_{v,Ed} = 42 \text{ kN / ruuvi} \quad \text{OK} \quad 26 \%$$

Kestävyys Ulkoinen voima

##### Palamurtuminen $V_{eff,1,Rd}$

$$V_{eff,1,Rd} = f_{u,l} \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_{y,l} \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$$

##### Murtumistapa 1

$$V_{eff,1,Rd} = 649 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 250 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad 39 \%$$

##### Murtumistapa 2

$$V_{eff,1,Rd} = 1216 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 250 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad 21 \%$$

##### Murtumistapa 3

$$V_{eff,1,Rd} = 221 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 42 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad 19 \%$$

#### Poskilevyn vetokestävyys

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_{ul} / \gamma_{M2} = 584 \geq N_{Ed} = 250 \quad \text{OK} \quad 43 \%$$

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 799 \geq N_{Ed} = 250 \quad \text{OK} \quad 31 \%$$

#### HITSI: Pienahitsin kestävyys on riittävä jos seuraava ehto on voimassa:

$$[\delta_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_{u,l} / (\beta_w \cdot \gamma_{M2})$$

Maksimi a-mitta sidottu putkipalkin kestävyys

$$\text{HITSI: } a = 4 \text{ mm}$$

$$a_{\text{-max}} = 4,6 \text{ mm}$$

$$217 \leq 453 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK} \quad 48 \%$$

#### LIITOKSEN HYVÄKSIKÄYTTÖASTE:

#### LIITOKSEN MURTUMISTAPA:

64 %

HAURAS